



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

배수재료로서 굴 패각과 **Bottom Ash**의  
전과정 **CO<sub>2</sub>** 배출량에 따른 환경성 평가

Environmental Evaluation of Oyster Shell  
and Bottom Ash as Drainage Materials  
based on Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions

2019년 7월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부

지역시스템공학 전공

전 지 훈

# 배수재료로서 굴 폐각과 Bottom Ash의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량에 따른 환경성 평가

Environmental Evaluation of Oyster Shell  
and Bottom Ash as Drainage Materials  
based on Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions

지도교수 손 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2019년 7월

서울대학교 대학원  
생태조경 · 지역시스템공학부  
지역시스템공학 전공

전 지 훈

전지훈의 석사 학위논문을 인준함  
2019년 7월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 국문초록

우리나라에서는 좁은 국토의 활용 극대화를 위하여 간척지 등 연약지반의 활발한 개발을 수행해왔다. 일반적으로 이러한 지반에서는 토양의 높은 세립분 함량으로 인하여 배수성이 불량한 특징이 있다. 이러한 특징은 발작물 생육, 구조물 축조 등 고부가가치 목적으로의 이용을 어렵게 하므로, 지반의 다각적인 활용을 위해서는 불량한 배수성의 개선 대책이 필요하다.

한편, 국내에서는 약 20만 톤 내외의 굴 폐각이 발생되어 경관 저해 및 악취 생성, 해양 생태계 파괴를 일으키고 있다. Bottom ash 또한 국내에서만 연간 110만 ~ 180만 톤가량 배출되며, 상당수가 매립, 야적되어 여러 환경 문제를 야기하고 있으므로 이에 따라 굴 폐각과 Bottom ash의 재활용에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나, 이와 같은 산업폐기물을 재활용하는 경우 재활용 재료 자체로 인한 오염, 가공, 운송, 시공에 따른 오염물질 배출 등에 의한 환경성 저하가 발생할 가능성이 있으므로, 재료의 재활용 적합성 및 환경성 평가가 선행되어야 한다.

이에 따라, 본 연구에서는 배수 불량 지반의 배수성 개선을 위한 재료로서 폐기물로 취급되는 굴 폐각과 Bottom ash의 재료 적합성 평가를 수행하고, 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통한 정량적 환경성 평가를 수행하였으며, 이를 토대로 재료의 재활용성을 평가하였다.

대상 재료의 배수재 재활용 적합성을 평가한 결과, 굴 폐각과 Bottom ash는 혼합 및 수평배수층을 통한 배수개선 재료로서 모래를 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 단, 굴 폐각의 높은 Cu 함량과 Bottom ash의 낮은 CEC를 고려한 시공이 필요할 것으로 사료된다. 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통하여 대상 재료 재활용에 따른 감축효과를 확인하였으며, 이에 대한 정량적인 분석을 실시하였다. 또한, 이에 따른 재료의 적용성을 평가한 결과 국토 내 상당수의 지역에 대상 재료를 모래 대체 배수재로서 이용할 경우 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 배수불량 지반의 친환경 배수재료로서 굴 패각과 Bottom ash의 재활용의 실용화에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 굴 패각과 Bottom ash의 대량처리, 천연 골재 수급난 억제, 배수불량 지반의 활용성 확대 등 다양한 부가 효과가 기대된다.

주요어 : 굴 패각, Bottom ash, 재활용, 배수재, 전과정 CO<sub>2</sub> 평가  
학 번 : 2017-28752

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구개요 .....	3
제 2 장 연구사 .....	4
2.1 전과정평가 (Life Cycle Assessment, LCA) ...	4
2.2 굴 폐각 및 Bottom Ash의 재활용 .....	5
2.3 굴 폐각 및 Bottom Ash의 환경성 평가 .....	6
제 3 장 이론적 배경 .....	8
3.1 토양개량, 수평배수층을 통한 배수개선방법 .....	8
3.2 전과정평가 (Life Cycle Assessment, LCA) ...	12
제 4 장 연구 범위 및 방법 .....	16
4.1 대상 재료의 적합성 평가 .....	16
4.1.1 평가 재료 .....	16
4.1.2 재료의 물리적 특성 평가 .....	18
4.1.3 재료의 환경적 특성 평가 .....	19
4.2 환경성 평가의 범위 .....	20
4.2.1 평가 대상 및 범위 .....	20
4.2.2 가정 및 제한사항 .....	22
4.3 환경성 평가의 방법 .....	23
4.3.1 데이터 수집 .....	23
4.3.2 전과정 CO <sub>2</sub> 배출량 산출 .....	24

4.4 CO <sub>2</sub> 배출량에 따른 재료의 적용성 평가 .....	25
4.4.1 재활용 재료 발생지 선정 .....	26
4.4.2 재활용 재료의 최대 운송 범위 산출 및 매핑 .....	27
 제 5 장 결과 및 고찰 .....	 29
5.1 대상 재료의 적합성 평가 .....	29
5.1.1 물리적 특성 검토를 통한 적합성 평가 .....	29
5.1.2 화학적, 환경적 특성 시험을 통한 적합성 평가 .....	33
5.2 전과정 CO <sub>2</sub> 배출량 산출 .....	36
5.2.1 단위면적당 시공량 산출 결과 .....	36
5.2.1.1 토양 혼합 재료 .....	36
5.2.1.2 수평배수층 재료 .....	38
5.2.2 전과정 CO <sub>2</sub> 배출량 산출 .....	39
5.2.2.1 토양 혼합 재료 .....	39
5.2.2.2 수평배수층 재료 .....	43
5.2.3 재활용에 따른 전과정 CO <sub>2</sub> 배출량 감축효과 .....	46
5.2.3.1 토양 혼합 재료 .....	46
5.2.3.2 수평배수층 재료 .....	47
5.3 CO <sub>2</sub> 배출량에 따른 재료의 재활용성 평가 .....	49
5.3.1 모래 운송거리에 따른 재활용성 .....	49
5.3.2 재활용 재료의 최대 운송거리 산출 .....	53
5.3.3 매핑을 통한 재활용성 평가 .....	59
 제 6 장 요약 및 결론 .....	 63
 참고문헌 .....	 65
Abstract .....	71

## 표 목 차

Table 3.1 Typical permeability coefficient of soil types · 9	9
Table 3.2 Construction procedures of horizontal drains · 10	10
Table 3.3 Capillary rise heights of soils ····· 11	11
Table 4.1 Specifications of sand for horizontal drain ····· 18	18
Table 4.2 Standards for soil contamination by heavy metals ····· 19	19
Table 4.3 Unit weight of materials ····· 22	22
Table 4.4 Construction equipments in each case ····· 23	23
Table 4.5 CO <sub>2</sub> Emissions by acquisition and processing of materials ····· 23	23
Table 4.6 CO <sub>2</sub> Emissions by transportation of materials 24	24
Table 4.7 CO <sub>2</sub> Emissions by construction equipments ··· 24	24
Table 4.8 Locations of oyster shell, bottom ash sources 26	26
Table 5.1 Permeability coefficient (k) of the soil by mixing ratio ····· 30	30
Table 5.2 Permeability coefficient (k) of materials ····· 32	32
Table 5.3 The results of XRF, XRD, soil contamination analysis ····· 33	33
Table 5.4 CEC of soil, oyster shell and bottom ash ····· 34	34
Table 5.5 Amount of materials required for 1m <sup>2</sup> construction (Case 1) ····· 37	37
Table 5.6 Weight of materials for 1m <sup>2</sup> construction (Case 1) ····· 37	37
Table 5.7 Volume of materials for 1m <sup>2</sup> construction (Case 1) ····· 37	37



Table 5.8 Amount of materials required for 1m <sup>2</sup> construction (Case 2) .....	38
Table 5.9 Life cycle CO <sub>2</sub> emissions by materials (Case 1)	40
Table 5.10 E <sub>A</sub> by materials and mixing ratio (Case 1) ...	40
Table 5.11 E <sub>B</sub> by materials and mixing ratio (Case 1) ...	41
Table 5.12 E <sub>C</sub> by materials and mixing ratio (Case 1) ...	41
Table 5.13 Life cycle CO <sub>2</sub> Emissions by materials and mixing ratio (Case 1) .....	42
Table 5.14 Life cycle CO <sub>2</sub> emissions by materials (Case 2) .....	43
Table 5.15 E <sub>A</sub> , E <sub>B</sub> , E <sub>C</sub> , E by materials (Case 2) .....	44
Table 5.16 Maximum transportation distance of materials (Case 1) .....	51
Table 5.17 Maximum transportation distance of materials (Case 2) .....	52
Table 5.18 Maximum transportation distance of recycled materials (Case 1) .....	56
Table 5.19 Maximum transportation distance of recycled materials (Case 2) .....	58
Table 5.20 Recycability evaluation result of materials (Case 1) .....	61
Table 5.21 Recycability evaluation result of materials (Case 2) .....	61

## 그 립 목 차

Fig. 1.1 The research process flowchart .....	3
Fig. 3.1 The principles of resalinization in reclaimed land .....	10
Fig. 3.2 Phase and applications of LCA .....	13
Fig. 3.3 Simplified procedures for inventory analysis ....	14
Fig. 3.4 The framework of input-output tables .....	15
Fig. 4.1 Location of samples for recycability evaluation	17
Fig. 4.2 System boundary .....	20
Fig. 4.3 Case selection and detailed processes .....	21
Fig. 4.4 Location of oyster shell and bottom ash .....	27
Fig. 5.1 Permeability coefficient (k) of the soil by mixing ratio .....	30
Fig. 5.2 Particle size distribution of materials .....	31
Fig. 5.3 Life cycle CO <sub>2</sub> Emissions by materials and mixing ratio (Case 1) .....	42
Fig. 5.4 Life cycle CO <sub>2</sub> emissions by construction conditions (Case 2) .....	45
Fig. 5.5 Reduction ratio of Life cycle CO <sub>2</sub> emissions (Case 1) .....	46
Fig. 5.6 Reduction ratio of Life cycle CO <sub>2</sub> emissions (Case 2) .....	47
Fig. 5.7 Maximum transportation distance of oyster shell (Case 1) .....	50
Fig. 5.8 Maximum transportation distance of bottom ash (Case 1) .....	50

Fig. 5.9 Maximum transportation distance of materials (Case 2) .....	52
Fig. 5.10 Life cycle CO <sub>2</sub> emissions according to transportation distance (Case 1) .....	54
Fig. 5.11 Maximum transportation distance of materials (Case 1) .....	55
Fig. 5.12 Maximum transportation distance of materials (Case 2) .....	57
Fig. 5.13 Application range maps for oyster shell, bottom ash (Case 1) .....	60
Fig. 5.14 Application range maps for oyster shell, bottom ash (Case 2) .....	60

## 사 진 목 차

Photo 4.1 Materials for recycability evaluation .....	17
Photo 5.1 SEM image of materials (×500) .....	29

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

우리나라에서는 좁은 국토의 활용 극대화를 위하여 간척지 등 연약지반의 지속적인 개발을 수행해왔다. 이러한 지반을 이루는 토양은 일반적으로 세립분 함량이 높아 낮은 투수성을 나타내며, 이는 지반의 배수 불량 문제를 일으킨다. 특히, 간척지는 바다와 인접하여 염분이 다량 포함된 지하수가 표토와 가깝게 분포하고, 토양의 염분함량이 매우 높게 나타난다. 이는 지반의 배수불량 문제와 연결되어 자연강우나 담수 공급에 의한 염분 제거를 어렵게 하고 모세관 상승을 통한 토양 염농도 상승에도 취약하게 하여, 밭 작물 생육, 구조물 축조 등 고부가가치 목적으로의 이용을 어렵게 하고 있다. 따라서, 배수 불량 지반의 다각적인 활용을 위해서는 지반의 배수성 개선이 필요하다. 이는 배수로, 명·암거, 배수층 등 배수 시설의 설치, 토양 개량 등의 방법을 통하여 수행할 수 있다.

특히, 수평배수층은 주로 모래를 이용하여 연약지반의 하부에 배수층을 조성하는 방법으로 대상 지반의 연약층 상부와 지하 배수의 개선 효과를 나타낸다. 배수 개선을 위한 토양 개량은 토양 개량제나 비료, 유기물, 입경이 큰 재활용 재료 등을 세립토 지반에 혼입시켜 토양의 평균 입경을 개선하거나 화학적 조성을 이용 목적에 맞게 개량하는 방법으로, 즉각적이고 지속적인 효과를 나타내는 장점이 있다.

최근 천연 골재의 감소와 환경에 대한 관심이 증가함에 따라 다양한 산업 폐기물을 이용하여 천연 모래를 대체하고자 하는 추세가 나타나고 있으며, 이에 따라 천연 모래를 대체한 재활용 배수재의 필요성이 제기되고 있다.

국내에서는 경남 통영·거제, 전남 여수 등을 중심으로 연간 약 28만 4000여 톤의 굴이 생산되고 있으며 (해양수산부, 2017), 이에 따라 약 20만 톤 내외의 굴 폐각이 발생되고 있다. 이러한 굴 폐각은 약 75%가 비

료, 사료 등으로 재활용되고 있으나 대량 처리의 어려움, 판매 불황 등으로 인하여 그 재활용량이 점차 감소하고 있다 (Sung and Kim, 2010). 또한, 굴 폐각 폐기물의 상당수가 불법 매립, 야적되어 경관 저해 및 악취 생성, 해양 생태계 파괴 등 다양한 환경문제를 일으키고 있다.

Bottom ash는 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄연소부산물의 약 25%를 차지하는 물질로서, 석탄 연소과정에서 보일러 하부에 낙하, 배출된다. 국내에서는 그 발생량이 연간 110만~180만 톤에 달하며, 약 60%가 매립되어 처리되기 때문에 여러 환경 문제를 야기하고 있다 (Koh et al., 2010; Yun, 2015).

굴 폐각과 Bottom ash를 배수가 불량한 지반의 배수 재료로 재활용이 가능한 경우 지반의 배수 개선 효과 뿐만 아니라 산업부산물의 대량 재활용을 통한 환경적 이익 극대화 효과를 동시에 거둘 수 있다. 이를 위해서는 재료에 대한 물리적 특성 조사가 선행되어 천연 모래 대체가능성이 검증되어야 하며, 폐자원 자체 또는 용출액을 통한 환경오염 가능성이 존재하므로 화학적, 환경적 측면에서도 적합성 평가가 수행되어야 한다. 또한, 폐기물이 재활용성을 갖기 위해서는 자연재료 이용 시보다 오염물질 배출이 절감되어 환경적 우위를 가져야한다. 그러나, 폐기물을 재활용하여 이용할 경우 인접한 공급원에서 자연 재료를 획득하는 경우보다 먼 운송거리로 인하여 운송수단의 환경오염물질 배출이 증가할 수 있다. 즉, 재활용 재료의 이용이 반드시 환경적 이익으로 이어지지 않으며, 오히려 오염 물질 배출량 측면에서 불리할 가능성이 존재한다. 따라서 재활용 기술의 실용화를 위해서는 객관적, 정량적인 환경성 평가가 적절히 선행되어야 한다.

이에 따라, 본 연구에서는 폐기물로 취급되는 굴 폐각과 Bottom ash의 공학적, 환경적 특성을 검토하여 배수 불량 지반의 개선을 위한 배수재료로서 재활용 적합성을 확인하였다. 또한, 재료의 획득, 가공, 운송, 시공 단계를 고려한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통한 정량적 환경성 평가를 수행하여 배수재료로서 굴 폐각과 Bottom ash 재활용의 실용화 발판을 마련하고자 하였다.

## 1.2 연구개요

본 연구는 굴 패각과 Bottom ash의 재활용을 위하여 배수 불량 지반의 배수 재료로 이용할 경우에 대한 재료의 적합성을 검토하고, 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통한 정량적 환경성 평가를 수행하였다. 또한, CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 재활용 재료의 적용성을 평가하였다. 본 연구의 수행 과정을 정리하여 나타내면 다음 Fig 1.1.과 같다.

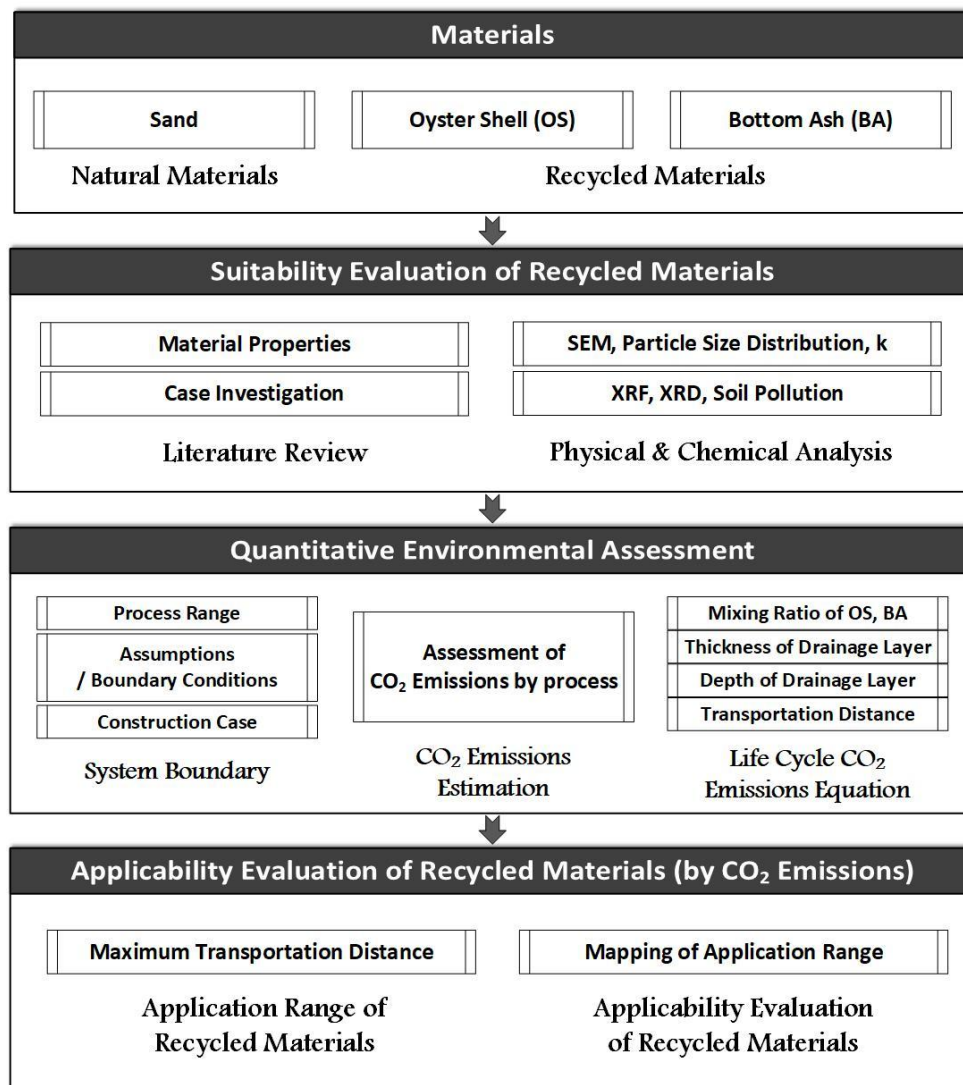


Fig 1.1 The research process flowchart

## 제 2 장 연구사

### 2.1 전과정평가 (Life Cycle Assessment, LCA)

전과정평가 (全科程評價, Life cycle assessment)는 1960년대 미국 에너지부 (DOE)에 의하여 연료순환에 대한 여러 연구가 수행되면서 처음 시도되었다. 1970년대 초반, 환경 분야의 관심이 생산시스템 및 전과정 평가로 이동되면서 1979년 환경독성학 및 화학 협회 (SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry)가 설립되었다. 1990년 SETAC이 개최한 회의에서 Life cycle assessment (LCA)를 비롯한 많은 용어를 처음 정의하였다. 또한, 이 회의에서 전과정 평가를 재고 목록, 영향 평가, 향상 분석의 세 가지 상호 연관된 요소를 포함하는 상접근법 (phase approach)으로 정의하였으며, 이후 전망 (scoping) 단계가 추가되었다.

1990년 이후, 환경 분야에서의 이목이 에너지, 원료물질 및 고형 폐기물 등 다양하게 확장되면서 전과정 평가에 대한 관심이 집중되었으며, 평가 방법에 대한 표준화가 진행되었다. 1997년 국제표준기구 (ISO, International Standards Organization)는 ISO 14040 Standard-Principles and framework, ISO 14044 Life cycle assessment-Requirements and guidelines 을 제정하였다. 이를 바탕으로, 각국 정부, 학계, 기업에 의하여 다양한 전과정 평가의 가이드라인과 기준이 개발되고 있으며 다양한 분야와 제품에 대한 평가 사례가 축적되고 있다.

국내에서는 1997년 전과정평가의 국내 보급, 국내 실정에 맞는 방법론 제시 등을 목적으로 한국전과정평가학회가 설립되었으며, 1999년 학회지 발행을 시작하였다. 2003년에는 ISO 14044의 절차에 따라 국가 LCI 종합정보망이 구축되어 서비스되기 시작하였으며, 2019년 현재 환경부와 산업통상자원부에서 개발한 438개의 LCI 데이터베이스가 제공되고 있다.

## 2.2 굴 패각 및 Bottom ash의 재활용

최근 자갈, 강, 바다모래 등 천연 골재의 고갈, 환경에 대한 관심 증대로 인한 천연 골재 채취 규제 강화로 골재 수급난이 나타나고 있으며, 이에 따라 다양한 산업폐기물을 재활용하여 천연 골재를 대체하는 방안에 대하여 관심이 증가하고 있다.

굴 패각의 재활용을 위한 연구는 일본에서 1980년대 초 시작되었으며, 물리·화학적, 환경적 특성 연구 결과를 바탕으로 비료, 사료, 건설재료로서의 재활용 적합성 검토 연구도 활발하게 수행되어 왔다. 굴 패각은 약 90% 이상의 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ ) 으로 구성되어 있어, pH 8-10의 약알칼리성을 띠며, 산성토양에 굴 패각 분말을 시용할 경우 소석회와 유사한 산성토양의 산도조절 및 작물 증수효과를 나타낸다 (김종균 등, 1995). 또한, 사질토 입경으로 파쇄된 굴 패각 시료는 모래와 유사한 강도 및 투수특성을 가지며, 비교적 경량이다 (윤길립 등, 2001).

최근 국내 굴 패각 재활용량의 약 75%를 차지하던 비료, 사료 등이 처리 공정의 복잡성, 판매 불황 등으로 인하여 재활용률이 점차 감소하고 있으며 (전지훈 등, 2019), 이에 따라 굴 패각을 대량으로 처리하기 위한 재활용 방안에 대한 연구가 다수 수행되었다. 특히, 세립토의 물리적 특성 개선을 위하여 토양 혼합 재료로 이용하는 경우에 대한 강도, 압밀 및 투수 특성 연구가 수행되었으며 세립토의 투수성 개선 효과를 확인하였다 (손영진 등, 2003; 이기호 & 한종옥, 2001). 그 외에도, 최근의 골재 수급난과 가격상승 문제를 해소하기 위하여 철근 콘크리트 구조물의 골재 대체재 (이상철 등, 2007; 구해식 등, 2008), 수중 다짐말뚝 채움재 (Mikami & Okumura, 2007), 시멘트 및 모르타르 (Ez-Zaki, 2016) 등 자연 골재 대체재료의 재활용 가능성이 검토되었다.

Bottom ash의 재활용을 위한 연구는 1970년대 말 시작되어, 현재는 대부분 건설재료로서의 이용을 위하여 기초 물성 및 재활용 적합성 평가 연구가 수행되고 있다. Bottom ash는 내부에 다공성 입자가 다수 관찰되며 우수한 투수성을 나타내고, 적절한 강도를 갖는다. 이에 따라, 배수



재 및 성토재, 뒷채움재 등 다양한 활용 방안에 대한 검토 연구가 수행되었으며 (김상천, 2009; 정상화 등, 2010; 최우석 등, 2013; 김동근 등, 2015), 특히, 김상천 (2009) 은 Bottom ash의 물리·화학적, 환경적 분석을 수행하여 연약지반의 배수층 재료로서 모든 기준에 부합함을 확인하였으며, 현장 시공을 통하여 모래를 대체한 수평배수층 재료로서의 적용성을 확인하였다. 그 외에, 일반적인 자연 골재와 비교하여 경량인 특성에 착안하여 경량골재 개발에 대한 연구도 다수 수행되었다 (조병완 등, 2004; 김강덕 & 강승구, 2007; Kim and Lee, 2011).

특히, 간척지에서 모래나 자갈 등 공극이 큰 조립질 재료를 이용하여 간척지 표토 하부에 모세관 차단층을 조성할 경우 배수 개선 및 염류의 상승 차단 효과를 거둘 수 있다 (Rooney et al., 1998; Hara et al., 2002). 이에 따라, 굴 폐각 및 Bottom ash를 재활용하여 모세관 차단층을 조성하는 연구가 다수 수행되었다. 유진희 등 (2014)은 Bottom ash를 이용한 모세관 차단층이 재염화 억제 효과를 갖는 것을 확인하였으며, 국립식량과학원 (2015)은 굴 폐각 및 Bottom ash 등을 활용, 모세관 차단층을 조성하여 토양의 제염 효과 및 작물 수량 증대 효과를 확인하였다. 김태진 (2019)은 굴 폐각 및 Bottom ash를 이용하여 간척지 토양의 투수성 증진 및 제염 촉진 효과를 확인하였다.

## 2.3 굴 폐각 및 Bottom ash의 환경성 평가

폐자원이 기존 천연재료의 대체재로서 재활용되는 경우 폐자원 자체 또는 용출액에 따른 환경 오염 우려 및 폐자원의 이용을 위한 가공, 운송 등 다양한 공정에 따라 직·간접적 환경부하가 발생할 가능성이 있으므로, 재활용에 따른 환경적 영향에 대한 검토가 선행되지 않고서는 폐자원 재활용의 환경성을 담보할 수 없다.

이에 따라, 폐각 및 Bottom ash의 재활용과 관련된 환경성 평가가 수행되었다. 문종익 등 (2002)은 굴 폐각 토양 혼합재료로 이용하는 경우에 대하여 중금속 용출을 검토하였으며, Park et al., (2018) 은 국내 11

개 화력발전소의 Bottom ash를 채취하여 중금속 함유량 농도 및 용출 시험을 수행하였으며, 재활용에 따른 환경적 무해성을 확인하였다.

전과정 평가 기법을 적용하여 굴 폐각을 포함한 폐각류와 Bottom ash의 환경성 평가를 수행한 사례도 존재하였다. 굴 폐각의 경우에는 주로 탄산칼슘 ( $\text{CaCO}_3$ ) 원료로 활용하는 방안에 대하여 환경성 평가가 수행되었으며 (Alvarenga et al., 2012; Kwon et al., 2004; 박승철, 2014). 이외에 폐각류의 잔류 부산물 관리방안을 제시하는 연구도 수행되었다 (Iribarren et al., 2010). Bottom ash는 주로 도로용 재료로 재활용되는 경우에 대한 환경 영향 평가가 수행되었으며, 이 과정에서 다양한 재료를 이용하여 천연 골재를 대체하는 경우의 환경적 효과가 함께 검토되었다 (Mroueh et al., 2001; Chiu et al., 2008; Huang et al., 2009). 이외에도, 저수지 제체 재료 및 산림골재 (Noh et al., 2015; Noh & Son, 2017) 등 건설재료로서의 환경성 평가가 수행되었다.

## 제 3 장 이론적 배경

### 3.1 토양개량, 수평배수층을 통한 배수개선방법

배수개선공법은 배수가 불량한 지반에서 이를 개선하기 위한 목적으로 실시될 수 있는 처리 방법들을 통칭한다. 따라서, 흙의 투수성을 직접 개선시키는 방법, 지반을 통과하는 물의 이동경로를 인위적으로 적절하게 생성 또는 유도하는 방법 뿐만 아니라 지중의 물을 빼내거나 지하수위를 저하시키는 방법 등을 모두 포함한다.

토양 개량은 토양 개량제나 비료, 모래, 유기물 등을 지반에 혼합하여 토양의 물리적, 화학적 성질을 이용 목적에 맞게 개량하는 방법으로, 즉각적이고 지속적인 효과를 나타내는 장점이 있다. 투수성이 낮은 세립토 지역에서는 투수성이 우수한 모래 등의 조립질 재료, 토양개량제를 일정 비율로 혼합하여 토양의 투수성을 개선하는 것을 주요 목적으로 한다.

흙의 투수성은 물이 토양 내부로 얼마나 쉽게 통과할 수 있는지를 나타내는 성질로서, 흙의 투수성이 지반의 배수성을 결정하는 가장 큰 인자가 된다.

흙 속을 통과하는 물의 흐름은 그 유속의 크기에 따라 층류로 간주되며, 침투수량은 다음 식 (3-1), (3-2)와 같이 침투 경로에 대한 수위차인 동수경사 (Hydraulic gradient)에 비례한다.

$$v \propto i \quad (3-1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (3-2)$$

여기서,  $v$  : 유속 ( $cm/s$ )  
 $i$  : 동수경사  
 $\Delta h$  : 수두차  
 $L$  : 침투길이

Darcy (1856)는 식 (3-1)의 우변에 비례상수  $k$ 를 적용하여 유속과 동수경사의 관계를 다음 식 (3-3)과 같은 등식 형태의 실험식으로 제시하였다.

$$v = ki \quad (3-3)$$

여기서,  $v$  : 흙 속을 통과한 물의 유출유속 ( $cm/s$ )  
 $k$  : 투수계수

위 식 (3-3)에서, 투수계수는 유속과 동수경사의 관계를 나타내는 비례상수로 정의된다. 투수계수는 흙의 투수성을 나타내는 대표적인 지표로서, 흙의 종류 및 구조, 입도분포, 공극의 크기나 형상 등 다양한 조건에 의하여 변화하게 된다. 토양의 종류에 따른 개략적인 투수계수는 다음 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Typical permeability coefficient of soil types

흙의 종류	투수계수 ( $cm/sec$ )
굵은 자갈	$1 \sim 10^2$
가는 자갈 또는 중간 모래	$10^{-3} \sim 1$
가는 모래 또는 느슨한 실트	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
촉촉한 실트 또는 점토질 실트	$10^{-6} \sim 10^{-5}$
실트질 점토 또는 점토	$10^{-9} \sim 10^{-6}$

일반적으로 토립자의 입경이 큰 자갈, 모래 등 조립질 토양의 투수계수가 실트, 점토 등 세립질 토양의 투수계수보다 크게 나타나며, 이는 배수가 불량한 지반의 개량을 위하여 입경이 큰 재료로 치환하거나, 적정 비율 이상 혼합하여 이용하는 배경이 된다.

수평배수층은 연약지반의 하부에 배수층을 조성하는 방법으로, 이를 통하여 대상 지반의 연약층 상부 및 지하의 배수 개선 효과를 거둘 수 있다. 수평배수층 재료로는 모래나 쇄석, 그 밖의 다양한 배수성 재료가 이용될 수 있으며, 수평배수층의 조성은 주로 건설 현장에서 배수 개선

을 통한 압밀침하 촉진, 장비의 주행성 확보 등을 목적으로 실시된다. Table 3.2는 수평배수층의 일반적인 시공 과정을 나타낸 것이다.

Table 3.2 Construction procedures of horizontal drains

작업순서	수행 작업	특기사항
1	원 지반의 평탄화	지반고 측정 및 감독자 검사
2	사전 표면 배수	
3	수평배수층 재료 포설	도저를 이용하여 균일한 두께로 시공
4	안정성 검토	두께 조정 또는 상부 복토 수행

한편, 간척지 등 해안에 인접한 배수불량 지반에서는 토양 공극을 따라 염분을 포함한 지하수의 모관상승이 발생하고, 표토의 건조에 따라 상부 토양에 염분이 집적되는 현상인 재염화 (再鹽化, Resalinization) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 재염화 현상의 발생 원리를 모식도로 나타내면 다음 Fig 3.1 과 같다.

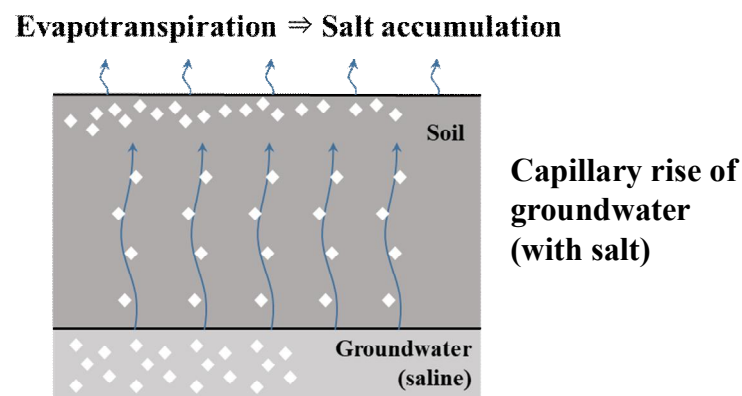


Fig 3.1 The principles of resalinization in reclaimed land

다음 Table 3.3는 토양 종류에 따른 일반적인 모관상승고를 나타내며, 배수 불량 지반을 구성하는 세립질 토양은 약 1 ~ 수십 m에 이르는 높은 모관상승고를 나타낸다.

Table 3.3 Capillary rise heights of soils (McCarthy, 1982)

흙의 종류	모관상승고 (cm)
잔 자갈	2 ~ 10
굵은 모래	15
가는 모래	30 ~ 100
실트	100 ~ 1000
점토	1000 ~ 3000

모세관 현상에서 모관상승고는 다음의 식 (3-4)와 같이 산정된다.

$$h_c = \frac{4T \cos \alpha}{\gamma_w d} \quad (3-4)$$

여기서,  $h_c$  : 모관상승고  
 $T$  : 물의 표면장력  
 $\gamma_w$  : 물의 단위중량  
 $d$  : 모관의 직경 (유효입경의 1/5)  
 $\alpha$  : 물과 모관이 접촉면에서 이루는 각

흙 속에서는 공극 직경, 연속성이 불규칙하여 모세관 현상의 형태를 정의하기 어렵다. 이와 관련하여, Hazen은 다음 식 (3-5)와 같이 사질토에서의 모관상승고에 대한 실험식을 제시하였다.

$$h_c = \frac{C}{e D_{10}} \quad (3-5)$$

여기서,  $h_c$  : 모관상승고  
 $C$  : 상수 (약 10~50)  
 $e$  : 물과 모관이 접촉면에서 이루는 각

지반 활용 시, 재염화 현상은 작물 및 구조물의 염해 원인이 되므로 이에 대한 대책을 마련하여야 한다. 그 대책으로서, 토양에 조립질 재료를 혼합할 경우 토양의 평균입경을 감소시켜 모관상승고를 감소시키며, 투수성을 증가시켜 하향 배수를 촉진시킴에 따라 지하수의 모관상승 억

제효과를 나타낸다. 또한, 모래나 자갈 등의 천연 재료 및 왕겨, 벚짳, 폐각류, Bottom ash 등의 산업폐기물을 이용하여 표토 하부에 모세관차단층을 조성하는 경우 배수층 재료의 낮은 모관상승고로 인한 모세관 차단 효과를 기대할 수 있다.

## 3.2 전과정평가 (Life Cycle Assessment, LCA)

전과정 평가는 생산품, 공정 및 활동 등이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 기법으로서, 원료물질의 획득 또는 수집으로부터 제품의 생산, 사용 및 폐기에 이르기까지 행해지는 모든 과정에 대한 환경적 영향을 식별하고, 정량화하는 방법이다 (Curran et al., 1996).

폐자원 자체 또는 용출액의 성분을 분석하여 환경기준에 적합한지 여부를 검토하여 수행된 기존의 환경평가 방법에 비하여, 전과정 평가는 주관성이 개입할 여지가 적으므로 평가 결과가 비교적 객관적이다. 또한, 평가 대상의 직·간접적 환경영향을 종합적으로 평가할 수 있으며 원료 또는 공정별로 정량적인 평가가 가능하다는 장점이 있다. 이에 따라, 정부, 기업 등 다양한 주체에 의하여 공공 의사결정이나 제품 개발 및 판매 전략 수립 등의 여러 단계에서 활발하게 적용되고 있다.

전과정 평가는 목적 및 범위 설정, 전과정 목록 분석, 영향 평가, 결과 해석의 4단계로 구분되어 수행되며, 평가 과정 전반에서 각각의 단계는 서로 상호보완적 관계를 갖고 서로 영향을 주고받게 된다. Fig. 3.2.는 ISO 14040에서 제시한 전과정 평가의 수행 단계 및 각 단계 간 관계, 평가 결과의 적용 등에 관한 도표에 각 단계와 관련된 ISO 표준을 추가하여 재구성한 것이다.

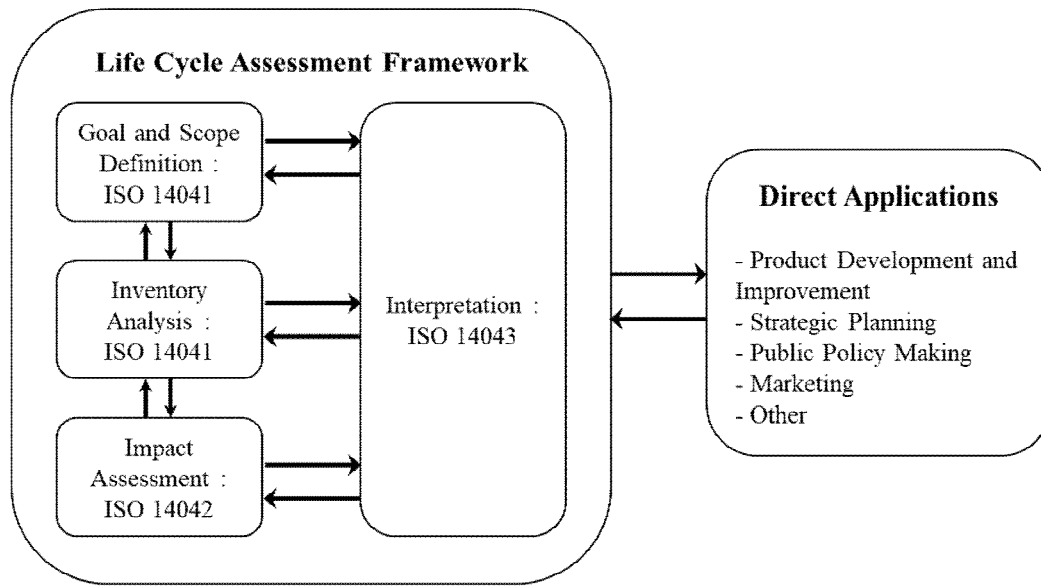


Fig 3.2 Phase and applications of LCA (ISO 14040: 2006(E))

첫 번째로, 목적 정의 및 범위 설정 단계는 평가의 목적, 예상 결과, 가정 및 경계조건 등을 정의하는 단계이다. 전과정 평가는 상품의 개발과 개선, 전략 수립, 마케팅 또는 공공의사결정 등 다양한 목적으로 이용될 수 있다. 일반적으로 평가 시스템은 원료의 획득, 제품 생산, 운송 및 분배, 사용, 재활용/폐기 단계로 구분하여 설정되며, 이러한 범위 설정 시 각 단계별 필요한 가정 및 제한, 기능 단위 등을 선정하게 된다.

두 번째 단계인 전과정 목록 분석 단계는 평가 시스템과 관련된 자원, 에너지 사용 및 환경 배출물을 정량화 하는 단계로서 원료 물질과 에너지의 획득, 가공, 생산품과 중간물질의 생산, 물질의 수송, 분배, 사용 및 처분 등이 모두 포함된다. Fig 3.3은 전과정 목록 분석 단계의 일반적인 수행 과정 및 과정별 요건을 나타낸 것이다.



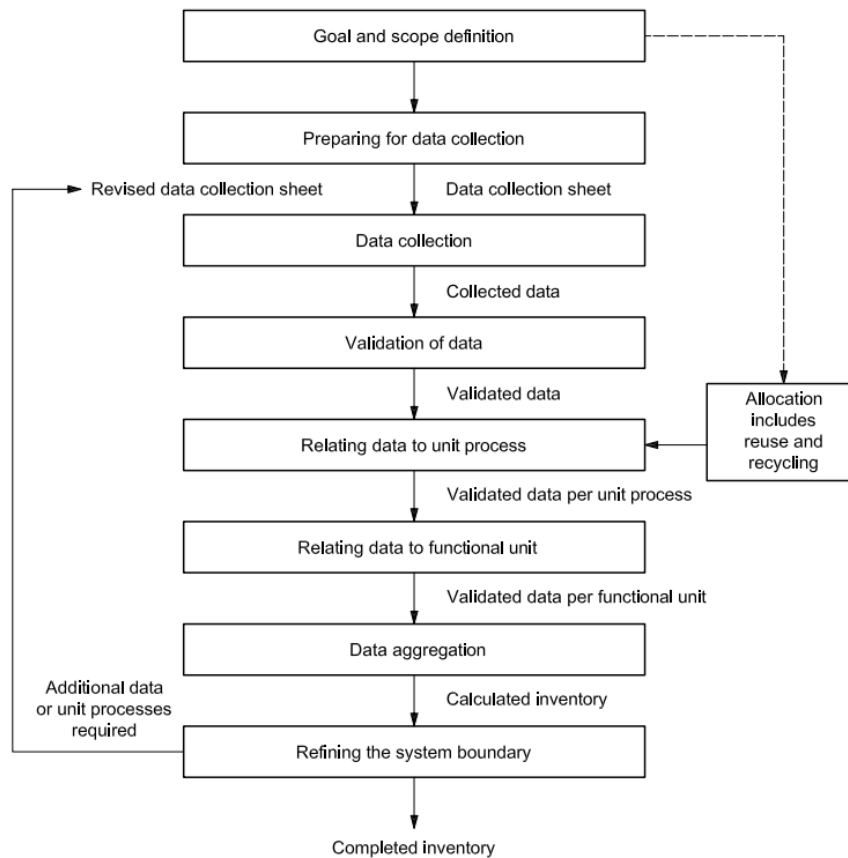


Fig 3.3 Simplified procedures for inventory analysis (ISO 14044: 2006(E))

이 단계는 대상 시스템 내에서 투입물 및 오염물질을 정량화하여 수집, 분석하는 과정이므로 이 단계에서의 방법론 설정이 평가 결과의 질에 큰 영향을 미칠 수 있다. 전과정 목록 분석 방법으로는 개별적산법 (Process analysis), 산업연관분석 (Input-Output analysis), 조합법 (Hybrid analysis) 등이 있다.

개별적산법은 제품과 시스템을 설계도서와 견적서 등으로부터 제조 공정, 소재 등에 따라 각각의 제품이 어떻게 제조되고 폐기되는지 구체적으로 조사하는 방법이다. 이 방법은 환경부하의 원인과 정도를 쉽게 파악할 수 있으며 이에 따른 대책 검토, 평가가 가능한 장점이 있으나 각 단계별 데이터 필요량이 많고, 시스템과 공정 검토가 수행되어야 하므로 많은 인력, 시간 및 비용이 필요하다는 단점이 있다.

산업연관분석법은 산업연관표를 이용하여 부문 간 가격을 기준으로 원

자재와 에너지가 분배된 경과와 이유를 역으로 분석하는 방법이다. 산업연관표는 일정기간 동안 국민 경제 내에서 생산된 모든 재화와 서비스의 산업 간 거래관계를 일정 원칙에 따라 행렬 형식으로 기록한 것으로, 다음 Fig 2.3과 같은 형식에 따라 작성된다.

		중간수요				최종수요	수입 (공제)	총산출액
		1	2	...	n			
중간투입	1	X11	X12	...	X1n	Y1	M1	X1
	2	X21	X21	...	X2n	Y2	M2	X2
	⋮		⋮			⋮	⋮	⋮
	n	X11	X12	...	X1n	Yn	Mn	Xn
부가가치		V11	V12	...	V1n			
총투입액		X1	X2	...	Xn			

Fig 3.4 The framework of input-output tables

이를 이용한 산업연관분석법은 직·간접적인 에너지 또는 원자재 소비량, 환경부하량을 빠짐없이 고려할 수 있기 때문에 평가 대상의 직, 간접적 목록을 이론적 산출이 가능하나 산업연관표에 포함된 항목이 불충분하여 공업제품, 신기술, 재활용 등의 분석에 적합하지 않은 단점이 있다.

조합법은 상기 2가지 방법을 적절히 조합하여 각 방법의 이점을 살리기 위한 방법이다. 주로, 어떤 한 종류의 목록분석 방법을 기초로 데이터를 수집하고, 다른 방법을 이용하여 환경 자료의 평가를 수행하게 된다.

세 번째 단계인 영향 평가는 배출 물질이 환경 및 인간에게 미치는 영향을 평가하는 단계이며, 이 과정에서 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 부여 등의 방법이 이용된다. 분류화는 목록으로부터의 결과를 상대적으로 균질한 영향 집단으로 할당, 집단화하는 과정이며, 특성화는 평가 대상 영향 집단 각각에 대하여 인체나 생태시스템 내의 질 등 주요 범주에 미치는 영향의 크기 및 잠재적 기여도를 평가하는 과정이다.

마지막으로, 결과 해석 단계에서는 환경에 큰 영향을 미치는 물질을 밝히고 개선 방안을 모색하는 단계로서, 평가 목적과 범위에 맞는 환경영향을 규명, 평가하여 최종결론을 도출하게 된다.

## 제 4 장 연구 범위 및 방법

### 4.1 재료의 적합성 평가

굴 패각, Bottom ash를 재활용하여 배수재료로서 천연 모래를 대체할 수 있는지 그 적합성을 평가하였다. 적합성 평가는 직접 채취한 시료에 대한 물리, 환경적 특성 분석을 통하여 수행되었다.

#### 4.1.1 평가 재료

평가에 이용된 재료는 그 입경과 이용목적에 고려하여 선정되었다. 각 재료의 사진과 수급 위치는 다음 Photo 4.1, Fig 4.1과 같다. 굴 패각은 국내 최대 굴 생산지인 경상남도 통영시의 한 야적장에서 직접 채취하여 코팅사 및 이물질을 제거한 후 실험실에서 수돗물로 세척하였다. 굴 패각의 파쇄 입경에 따라 재료의 투수성이 변화하게 되므로, 통일분류법상 모래의 입도분포를 고려하여 약 1~2mm의 입경으로 파쇄한 것을 이용하였다. Bottom ash는 영흥화력발전소에서 발생된 시료를 이용하였으며, 발전소 내 시설에서 파쇄 후 입도조정된 시료 중에서 모래 입경 범위와 굴 패각의 입경을 고려하여 1~3mm의 시료를 이용하였다. 자연 모래는 재활용 재료의 모래 대체 적합성을 평가하기 위한 비교 재료로서 이용되었다. 모래의 선정 시, 자연 모래의 다양한 입도분포, 종류를 특정하기 어려운 점을 고려하였으며, 토질분야에서 다양한 시험에 이용되는 주문진 표준사를 이용하였다. 이들 재료의 혼합재료 적합성을 평가하기 위한 세립질 토양은 간척지 토양 중에서 세립분 함량이 높으며 투수성이 불량한 화옹 간척지 8공구 내의 한 필지에서 직접 채취하였으며 실험실에서 건조시킨 후 이용하였다.

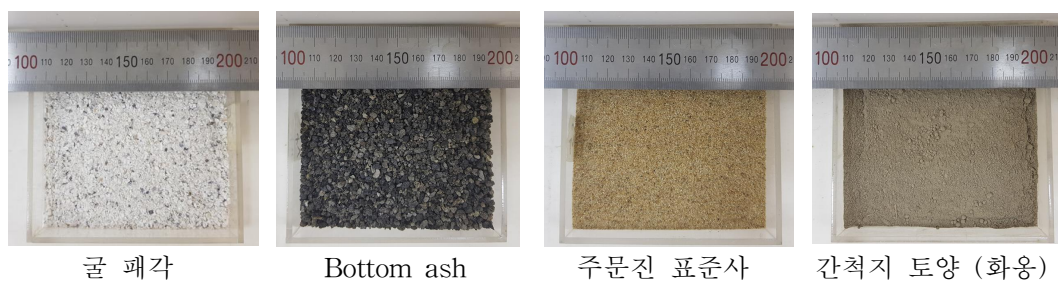


Photo 4.1 Materials for recyclability evaluation

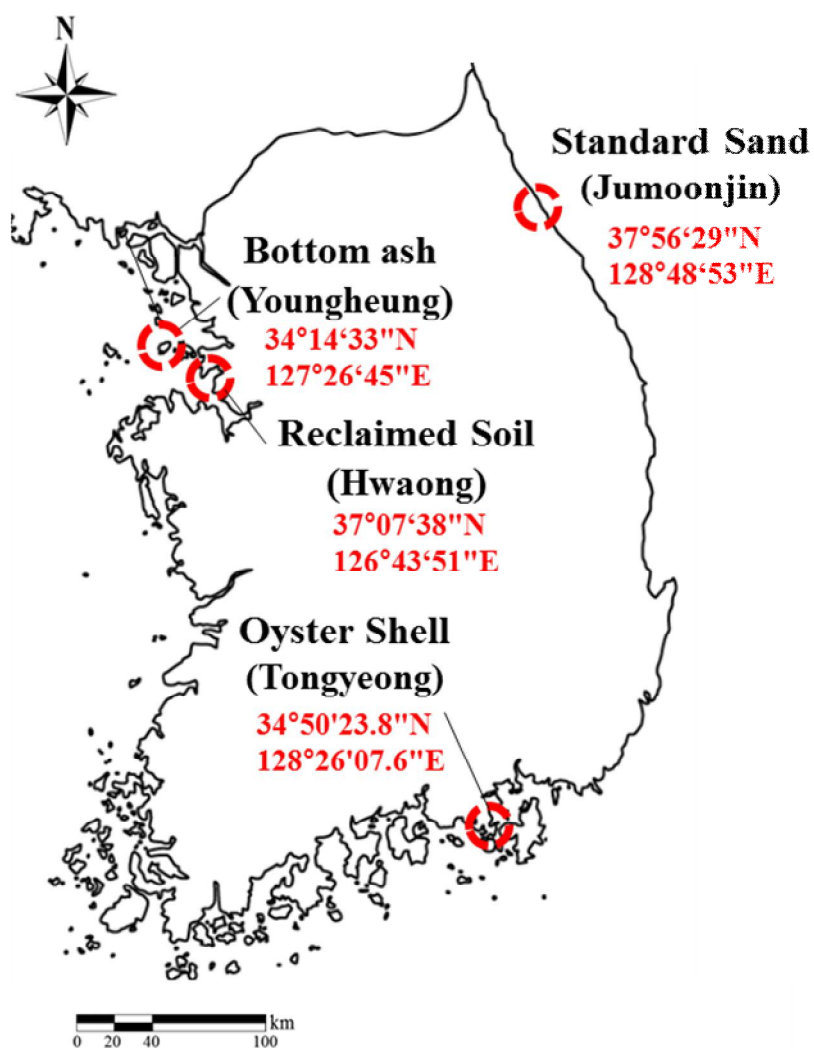


Fig 4.1 Location of samples for recyclability evaluation

#### 4.1.2 물리적 특성 평가

재료의 물리적 특성 평가는 건설 분야 전반에서 세립 지반의 배수 개선공법 재료로 사용되는 모래와의 비교를 통하여 수행되었다.

먼저, 굴 패각 및 Bottom ash의 입자 형상 관찰을 위하여 FE-SEM 이미지를 촬영하였으며, 실내시험을 통하여 혼합 재료로서의 적합성 검토를 위하여 대상 재료의 혼합에 따른 세립토의 투수성 개선 효과를 평가하였다. 이후 입도분포시험 및 투수 시험을 통하여 주문진 표준사, 굴 패각, Bottom ash의 입도 및 투수계수를 측정하고, 이를 수평배수층 재료의 품질기준과 비교하여 수평배수층 재료로서의 적합성을 평가하였다. 입도분포 시험은 KS F 2302에 명시된 체분석 방법에 따라 수행하였으며, 수평배수층에 사용되는 모래의 품질 기준은 Table 4.1과 같이 국토교통부 도로공사표준시방서에서 제시된 기준을 적용하였다.

Table 4.1 Specifications of sand for horizontal drain (MOLIT, 2015)

구분	기준 범위
D <sub>15</sub>	0.075 ~ 0.9 mm
D <sub>85</sub>	0.4 ~ 8.0 mm
< 0.075mm	15 % 이하
투수계수 (cm/sec)	1×10 <sup>-3</sup> 이상

굴 패각과 Bottom ash를 토양 혼합재료로 이용 시 투수성 개선 효과를 확인하기 위하여 화옹 토양에 각 재료를 혼합률 0 ~ 100% 범위에서 20% 간격으로 혼합한 총 6개 시료에 대하여 변수위 투수 시험을 수행하고, 혼합률 100%인 경우 측정된 재료 자체의 투수계수를 수평배수층 모래 기준 투수계수와 비교하여 적합성을 평가하였다. 투수 시험은 KS F 2322의 흙의 변수위 투수 시험 방법에 따라 수행하였다.

### 4.1.3 환경적 특성 평가

재료의 환경적 평가는 XRF (X선 형광 분석법, X-Ray Fluorescence spectrometry analysis), XRD (X선 회절 분석법, X-Ray Diffraction analysis), 토양오염도 분석 및 CEC (양이온 치환 용량, Consumer Electronics Control) 측정을 통하여 수행되었다.

XRF 분석은 토양 및 굴 폐각, Bottom ash의 화학적 조성 성분을 정량적으로 분석하기 위하여 수행하였으며, 분석 장비로는 Bruker社의 S4 PIONEER를 이용하였다. XRD 분석은 토양 및 대상 재료에 함유된 결정성 물질의 구조 정보를 얻기 위하여 수행되었으며, 분석 장비로는 Bruker社의 D8 ADVANCE를 이용하였다.

토양오염도 측정은 굴 폐각과 Bottom ash, 간척지 토양의 법정 중금속 8종 함량 분석을 통하여 수행되었으며, 이에 따라 혼합 재료로 이용 시 재료 자체에 의한 토양오염 가능성을 다양한 혼합물에 따라 검토하였다. 다음 Table 4.2는 토양환경보전법 시행규칙 (환경부, 2018)에서 제시한 중금속 함량에 따른 토양오염 우려기준 및 대책기준을 나타낸 것이다.

Table 4.2 Standards for soil contamination by heavy metals

(mg/kg)	Cr6+	Pb	Cd	As	Hg	Cu	Zn	Ni
우려 기준	5	200	4	25	4	150	300	100
대책 기준	15	600	12	75	12	450	900	300

CEC는 토양의 성질을 결정하는 주요 요소 중 하나로, 토양이 갖는 양이온 (Ca, Mg, K, Na 등)의 총량을 당량으로 나타낸 것이다. 이는 토양의 비옥도를 나타내는 수치로 CEC가 클수록 유효양분의 보유량과 완충능이 증가하게 되므로 작물 생육 시 유리하다. 각 재료 및 토양의 CEC는 농촌진흥청 연구조사 분석기준에서 제시한 치환침출법에 따라 측정되었으며, 이를 통하여 재활용 재료 혼합 시 혼합물에 따른 토양의 비옥도 영향을 검토하였다.

## 4.2 환경성 평가의 범위

### 4.2.1 평가 대상 및 범위

재료의 환경성 평가는 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정에 의하여 수행되었다. 평가에서 고려한 재료 및 공정의 범위는 다음 Fig 4.2와 같다.

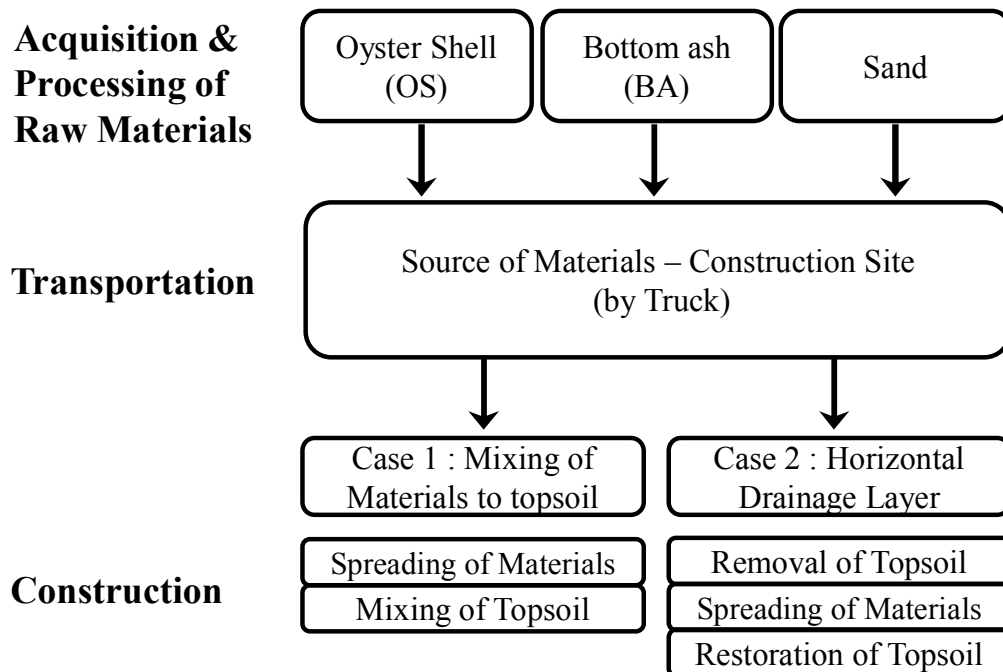


Fig 4.2 System boundary

공정의 범위는 재료 획득, 가공, 운송, 시공 단계를 고려하였으며, 공법에 대한 세부공정이나 기준, 연한이 정립되지 않은 실정이므로 유지보수 및 해체 단계를 평가 대상에서 제외하였다. 평가 대상 물질은 여러 환경 오염 물질 중에서 재활용 재료에 대한 객관적 환경성 평가 자료가 한정적인 실정 및 각종 협약 등을 통한 국제적 관심도를 고려하여 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)로 선정하여 배출량 평가를 수행하였다. 획득 및 가공단계에서

는 평가 대상 재료를 모래 입경의 건설재료로 이용하는 경우의 재료 채취, 가공 단계 CO<sub>2</sub> 배출량 자료를 수집하여 이용하였으며, 운송단계에서는 트럭을 이용하여 시공 현장까지 육로로 운송하는 경우를 고려하였다.

시공단계에서는 토양 개량 및 수평배수층을 통한 배수개선공법을 모두 고려하기 위하여 2가지 Case를 설정하였으며 각 Case별 세부공종 및 이용장비의 종류는 Fig 4.3과 같다.

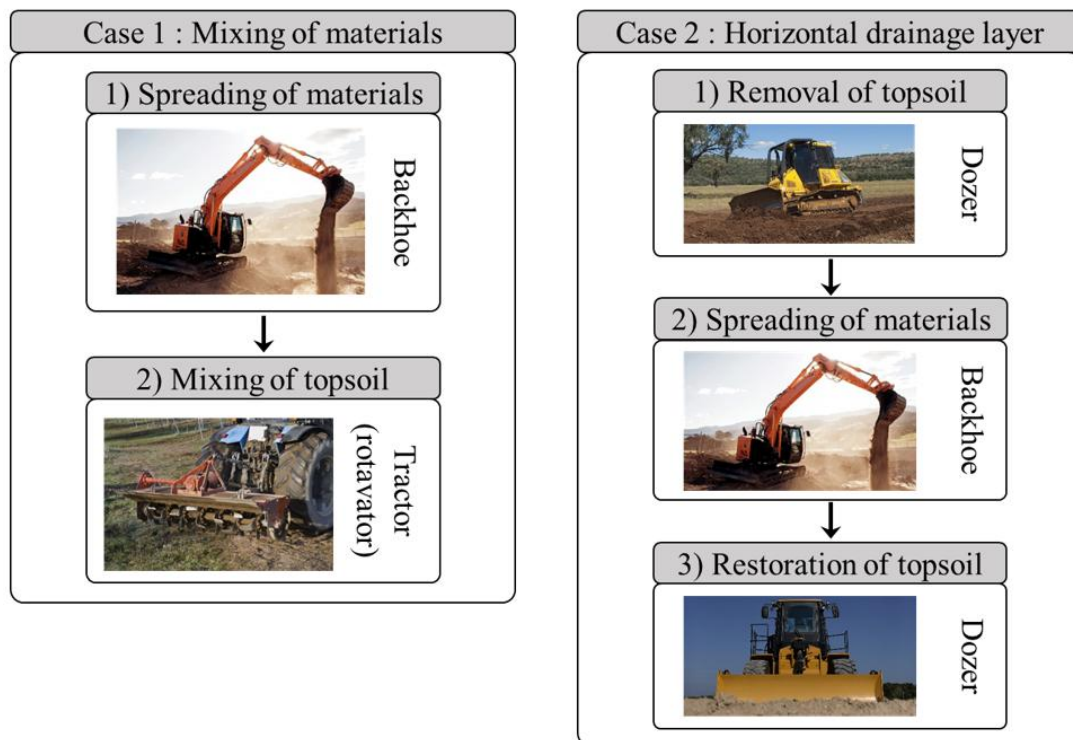


Fig 4.3 Case selection and detailed processes



#### 4.2.2 가정 및 제한사항

운송단계에서는 차량 규격과 운행 속도가 현장마다 상이하게 적용될 수 있으므로, 자료 수집 시 이를 통합적으로 고려한 국가 LCI DB 통합 공로수송 (환경부, 2008)을 적용하여 배출량 산출에 이용하였다.

Circuitry factor는 대상 지역의 도로거리와 직선거리의 관계를 나타내는 계수로, 다음 식 (4-1)와 같이 나타낸다. 국내 평균 Circuitry factor는 1.26 (Kim et al., 2013)로 산출되며, 이를 적용하여 직선거리에 따른 실제 운송단계 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다.

$$\text{Circuitry Factor} = \frac{(\text{Road Network Distance})}{(\text{Euclidean Distance})} \quad (4-1)$$

시공 단계에서, 시공량 산출 시 필요한 재료의 단위중량은 Table 4.3과 같이 표준품셈 및 각 재료별 특성을 검토한 문헌에 제시된 범위의 평균 값을 적용하였다.

Table 4.3 Unit weight of materials

	모래 (건조)	굴 패각	Bottom ash	세립토
단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	15.7	8.8	11.8	14.7 (Reclaimed)
출처 (문헌 범위)	KICT, 2019 (14.7~16.7)	Yoon et al., 2001	Moulton, 1973 (7.1~15.7)	농어촌연구원, 2017

시공 장비는 작업 종류에 따라 2019년 건설공사 표준품셈 (한국건설기술연구원, 2019)을 참고하여 선정하였으며 대상지인 국내 간척지의 열악한 인근 포장 현황, 접근성, 농업적 이용목적 등을 고려하여 소·중형 규격의 장비를 선정하였다. 트랙터에 부착하는 로타리의 경우, 심토 파쇄 또는 경운이 아닌 재료 혼합을 통한 토양 개량 목적임을 고려하여 경심 0.5m

까지 심경이 가능한 로터베이터를 선정하였다. 시공 세부공종별로 선정된 장비는 다음 Table 4.4와 같다.

Table 4.4 Construction equipments in each case

Case 1 : 토양 혼합		Case 2 : 수평배수층	
재료 포설	0.2m <sup>3</sup> Backhoe-Caterpillar	표토 제거	10t Bulldozer-caterpillar
표토 혼합	Tractor (Daedong, LX470C)	재료 포설	0.2m <sup>3</sup> Backhoe-caterpillar
	심경로터베이터 부착 (Woongjin, WJD160)	표토 복토	10t Bulldozer-caterpillar

## 4.3 환경성 평가의 방법

### 4.3.1 데이터 수집

재료의 획득 및 가공 단계 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 위하여 재료 별 CO<sub>2</sub> 배출량 자료를 다음 Table 4.5와 같이 수집하였으며 이를 Case별 시공 중량에 반영하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하였다. 굴 패각의 획득 및 가공 단계 배출량 자료는 재료의 채취, 이물질 제거를 위한 세척 및 열처리 (25 0℃), 모래 입경으로의 파쇄 공정을 고려하였다.

Table 4.5 CO<sub>2</sub> Emissions by acquisition and processing of materials

재료	배출량 (kgCO <sub>2</sub> /ton)	References
모래	3	한국건설기술연구원, 2004
BA	1.1	전해표, 2007
굴 패각	1.784	전지훈 등, 2019

운송단계에서는 다양한 운송수단의 규격 및 운행속도를 고려한 국가 LCI DB - 통합공로수송의 CO<sub>2</sub> 배출량 (환경부, 2008)을 적용하였다. 이를 정리하면 다음 Table 4.6과 같다.

Table 4.6 CO<sub>2</sub> Emissions by transportation of materials

공정	배출량 (kgCO <sub>2</sub> /t · km)	Reference
운송 (트럭 - 통합공로수송)	0.249	환경부 (2008)

시공단계에서 이용되는 장비에 따른 작업 시간당 CO<sub>2</sub> 배출량 자료를 수집하여 이용하였으며, 각각의 시간당 배출량 및 출처는 다음 Table 4.7과 같다.

Table 4.7 CO<sub>2</sub> Emissions by construction equipments

장비	배출량 (kgCO <sub>2</sub> /h)	출처
10t 무한궤도식 불도저	39.88	Noh (2014)
0.2m <sup>3</sup> 무한궤도식 백호	16.64	
트랙터 (LX470C, 마른로타리)	7.802	Park et al. (2010)

#### 4.3.2 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산출

전과정 CO<sub>2</sub> 배출량의 산정은 공정에 따른 세부 전과정 목록의 CO<sub>2</sub> 배출량을 합산하는 방법인 개별적산법 (Process Analysis)을 통하여 수행되었다. 본 연구의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 과정은 다음 식 (4-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$CO_2 \text{ Emissions } (E_{sand}, E_{OS}, E_{BA}) = E_A + E_B + E_C \quad (4-2)$$

여기서,  $E_{sand}, E_{OS}, E_{BA}$ : 각 Case의 재료별 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_A$  : 획득 및 가공단계 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_B$  : 운송단계 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_C$  : 시공단계 CO<sub>2</sub> 배출량

획득 및 가공 단계의 배출량은 재료 별로 수집된 배출량 자료를 Case 별 시공 중량에 반영하여 산정되었다. 운송 단계에서는 다양한 운송수단의 규격 및 운행속도를 고려한 배출량 계수를 적용하였으며, 국내 평균 우회율을 적용하여 직선거리에 따른 실제 운송거리를 고려할 수 있도록 하였다. 시공 단계에서의 배출량은 단위면적당 시공량에 따른 작업시간을 계산한 후, 장비 종류에 따른 시간당 배출량 자료를 반영하여 세부 시공단계별 배출량을 산정하고 이후 이를 적산하여 산출하였다. 작업시간 계산 시 백호와 불도저는 2019년 건설공사 표준품셈 (한국건설기술연구원, 2019)을 참고하였으며, 농업기계인 트랙터의 경우에는 Park et al. (2010) 이 제시한 마른로타리 작업속도 (0.3m/s) 와 로터베이터 제조사에서 제시한 경운 폭 (1.6m) 및 경심 (0.5m) 을 적용하였다.

#### 4.4 CO<sub>2</sub> 배출량에 따른 재료의 재활용성 평가

산정된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 이용하여, CO<sub>2</sub> 배출량에 따른 굴 폐각과 Bottom ash 재활용성 평가를 수행하였다. 먼저 배출량 측면에서 모래의 운송거리에 대응하는 재료의 운송거리를 산출하였다. 여기에 모래의 최대운송거리를 적용하여 재료의 Case별 최대운송범위를 산출하고, 선정된 주요 재료 발생원으로부터 재료의 최대운송거리를 적용한 Mapping을 통하여 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 효과에 따른 모래 대체 가능 지역을 제시하였다. 이후, 각 재료별 대체 가능 지역 면적을 제시하여 재활용성을 확인하였으며, 국토 면적에 따른 비율을 계산하였다.

#### 4.4.1 재활용 재료 발생지 선정

간척지 배수재료로서 굴 폐각과 Bottom ash의 재활용성을 평가하기 위하여, 각 재료별 국내 주요 생산지를 다음과 같이 선정하였다. 굴 폐각의 주요 생산지는 국내 지역별 생산량을 고려하여 경남 통영시 및 전남 여수시로 선정하였으며, 야적장 위치를 한정하기 어려우므로 재료의 발생 위치를 통영시 용남면 “굴 수하식 수협 본소 (Oyster NFFC HQ, Tongyeong)”, 여수시 교동 “굴 수하식 수협 여수지소 (Oyster NFFC, Yeosu)”로 선정하였다. Bottom ash의 경우 국내 주요 화력발전소 12개소 (전력거래소, 2018)를 발생원으로 적용하였다. 선정된 굴 폐각과 Bottom ash 발생원의 위치는 다음 Table 4.8, Fig 4.4와 같다.

Table 4.8 Locations of oyster shell, bottom ash sources

재료	발생원	Latitude (°)	Longitude (°)
굴 폐각	Oyster NFFC HQ (Tongyeong)	34.84	128.44
	Oyster NFFC (Yeosu)	34.74	127.73
Bottom ash	Samcheok	37.19	129.34
	Hadong	34.95	127.82
	Boryeong	36.40	126.49
	Taeon	36.90	126.23
	Youngheung	37.24	126.45
	Samcheonpo	34.91	128.10
	Youngdong	37.74	128.98
	Yeosu	34.83	127.66
	Dangjin	37.05	126.51
	Honam	34.85	127.74
	Donghae	37.48	129.14
	Bukpyeong	37.48	129.14

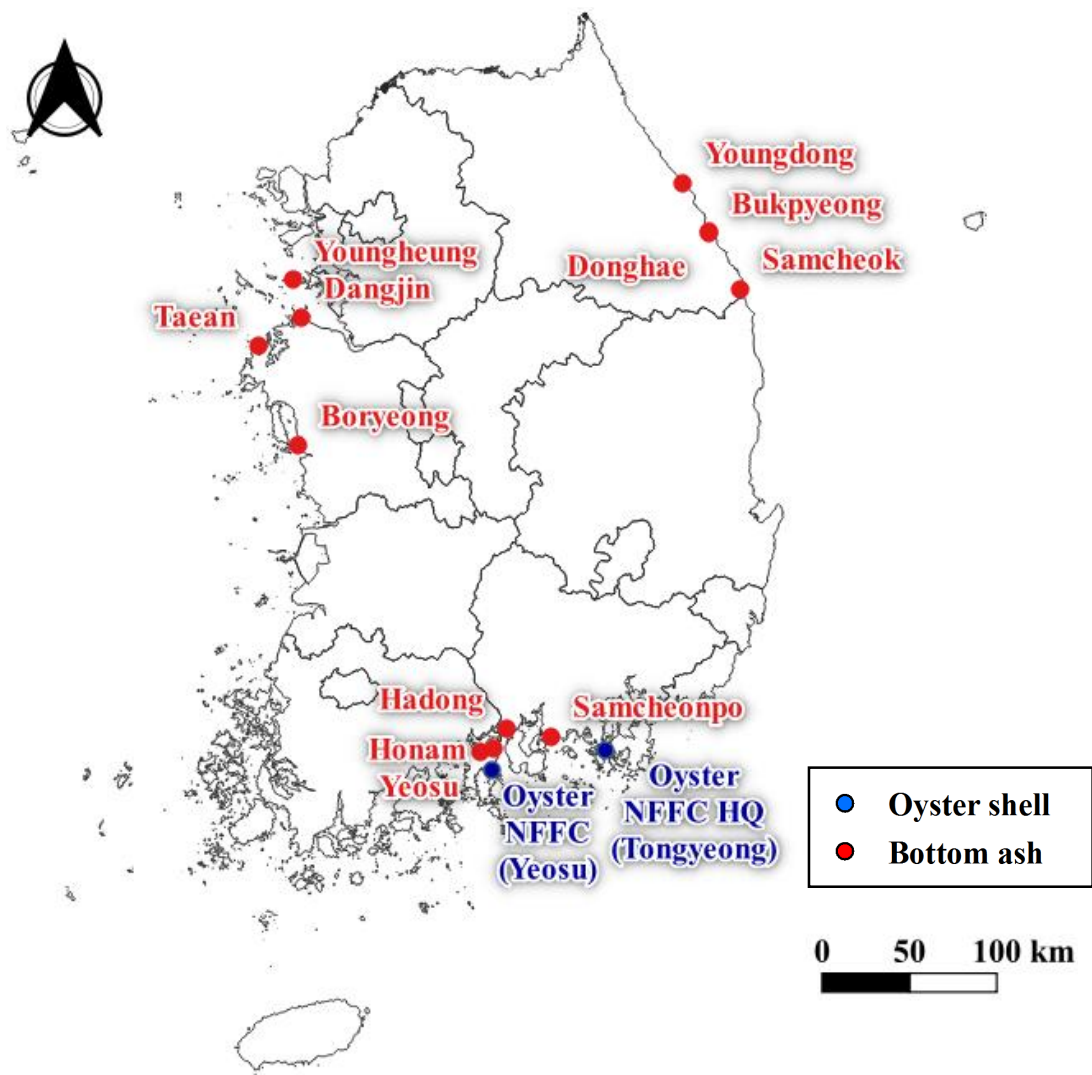


Fig 4.4 Locations of oyster shell and bottom ash

#### 4.4.2 재활용 재료의 최대 운송 범위 산출 및 매핑

재활용 재료의 운송 범위는 경제성을 고려한 골재의 최장운송반경 40km (산림청, 2006)을 모래의 최대 운송거리로 적용하였다. 이 때 모래의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량과 같은 값을 나타내는 굴 패각, Bottom ash의 운송거리를 산출하여 이를 최대 운송 거리로 설정하고, 해당 거리 내의 범위를 최대 운송 범위로 산출하였다.

산출된 굴 패각, Bottom ash의 발생원으로부터 최대 운송 거리 이내의 범위를 국내 지도에 적용하여 Mapping을 수행하였으며, Mapping에는 QGIS 3.4.3-Madeira 소프트웨어를 이용하였다. 이 과정에서, 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량에 따른 각 재료 별 적용 가능 지역을 각각 표시하고, 굴 패각과 Bottom ash를 모두 적용할 수 있는 경우를 별도의 영역으로 지정하여 도시하였다.

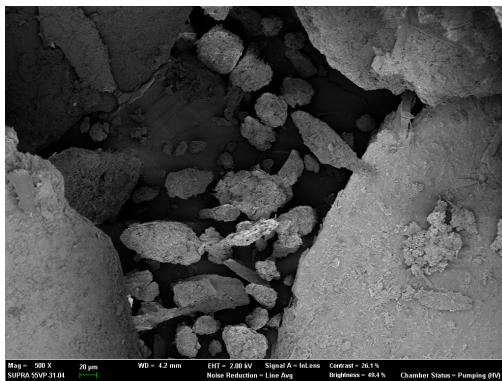
이후, Mapping된 지도 내에서 영역 별 면적을 산출하고, 각각의 영역 면적이 국토 면적 중 차지하는 비율을 계산하여 국내 현장 위치에 따라 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 효과 측면에서 굴 패각, Bottom ash의 모래 대체 배수재료로서의 재활용성을 평가하였다. 평가 시 이용된 국토 면적은 국토교통부 2017년 지적통계에서 제시된 100,364 km<sup>2</sup> 을 적용하였다.

## 제 5 장 결과 및 고찰

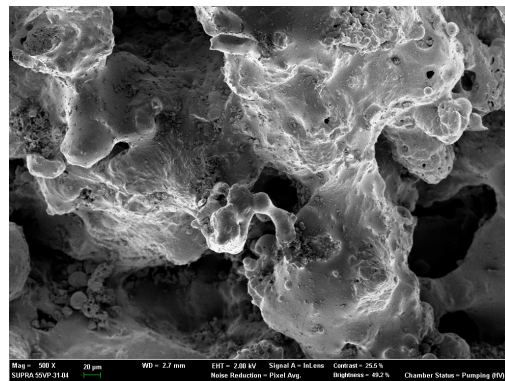
### 5.1 재료의 적합성 평가

#### 5.1.1 물리적 특성 검토를 통한 적합성 평가

적합성 평가에 이용된 굴 폐각 및 Bottom ash의 입자 형상을 분석하기 위하여 SEM 이미지를 촬영하였으며, 촬영 결과 중에서 입자 형상이 잘 나타난 500배율 이미지를 Photo 5.1과 같이 나타내었다.



굴 폐각



Bottom ash

Photo 5.1 SEM image of materials (×500)

Photo 5.1에서, 파쇄 굴 폐각 입자는 비교적 날카로운 단면의 판상 형태를 갖는 것을 관찰하였으며, 혼합 재료로 이용 시 그 혼합토가 모래 혼합토와는 다른 토양 구조를 나타낼 것으로 판단된다. 이에 따라 공극 특성이 다르게 나타나 투수성 증진 효과에도 영향을 미칠 것으로 사료된다. Bottom ash의 경우 입자 내에 구멍이 다수 관찰됨에 따라 Bottom ash 특성 연구에서 제시된 바와 같이 다공질 입자를 갖는 것을 확인하였으며, 이러한 Bottom ash의 다공성은 배수재료로의 재활용에 유리한 특성이 될 것으로 판단된다.



굴 패각 및 Bottom ash를 세립토의 혼합 재료로 이용하는 경우, 토양의 투수성 증진 효과를 확인하고 모래 이용 시의 효과와 비교하기 위하여 각 재료의 혼합률에 따른 화옹지구 혼합토에 대하여 변수위 투수 시험을 수행하였다. 그 결과는 다음 Table 5.1, Fig 5.1과 같다.

Table 5.1 Permeability coefficient (k) of the soil by mixing ratio

k (cm/s)	Mixing ratio (%)					
	0	20	40	60	80	100
Oyster shell		5.83E-06	3.57E-05	4.47E-03	1.85E-02	3.00E-02
Bottom ash	9.65E-07	1.18E-05	1.45E-05	1.86E-03	1.26E-02	3.29E-02
Jumoonjin Sand		4.62E-06	1.11E-05	4.30E-04	1.03E-03	2.58E-02

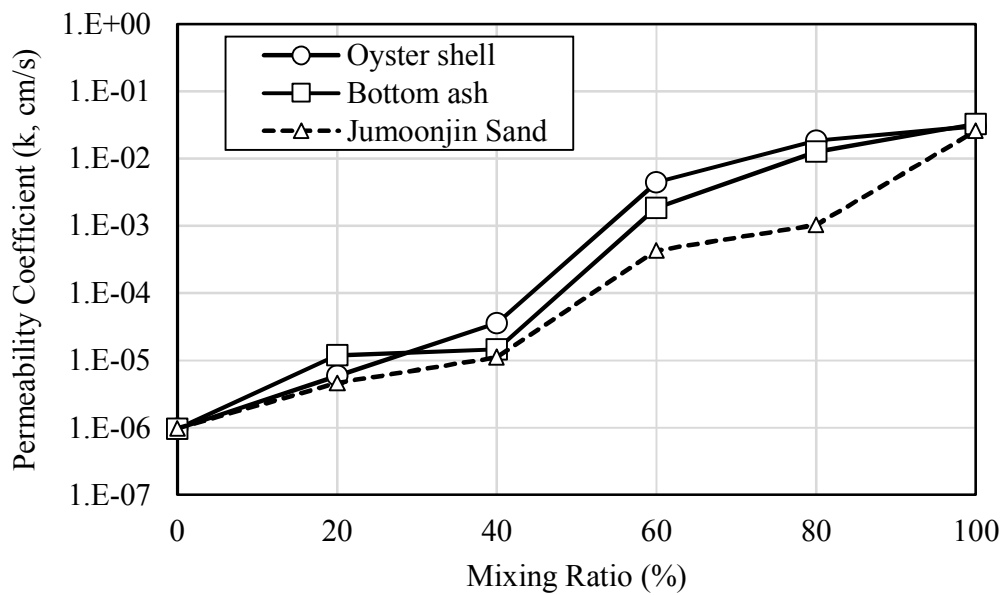


Fig 5.1 Permeability coefficient (k) of the soil by mixing ratio

상기 투수시험 결과에서, 혼합 대상 토양인 화용 간척지 토양은  $1 \times 10^{-6}$  cm/s 미만의 매우 낮은 투수성을 나타내었으며, 재료 혼합에 따른 투수성 증가 효과를 확인하였다. 본 연구에서는 굴 패각과 Bottom ash가 주문진 표준사보다 더 큰 투수성 증가 효과를 나타내었으나, 이러한 효과는 현장 토양의 입도분포 및 투수성, 혼합재료의 파쇄 입경 및 입도 분포, 투수계수 등에 따라 상이할 수 있다. 이에 따라, 실제 현장에서는 혼합물 설정 시 상기 조건들을 고려하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 전과정 CO<sub>2</sub> 평가 및 이에 따른 적용성 평가 시 다양한 혼합물 (0 ~ 100%)을 고려하여 다양한 혼합물 조건에 따른 평가 결과의 현장 별 적용이 가능하도록 하였다.

다음으로, 굴 패각 및 Bottom ash를 수평배수층 재료로 활용하기 위한 물리적 특성의 적합성을 확인하기 위하여 각 재료에 대한 입도분포 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음 Fig 5.2과 같다.

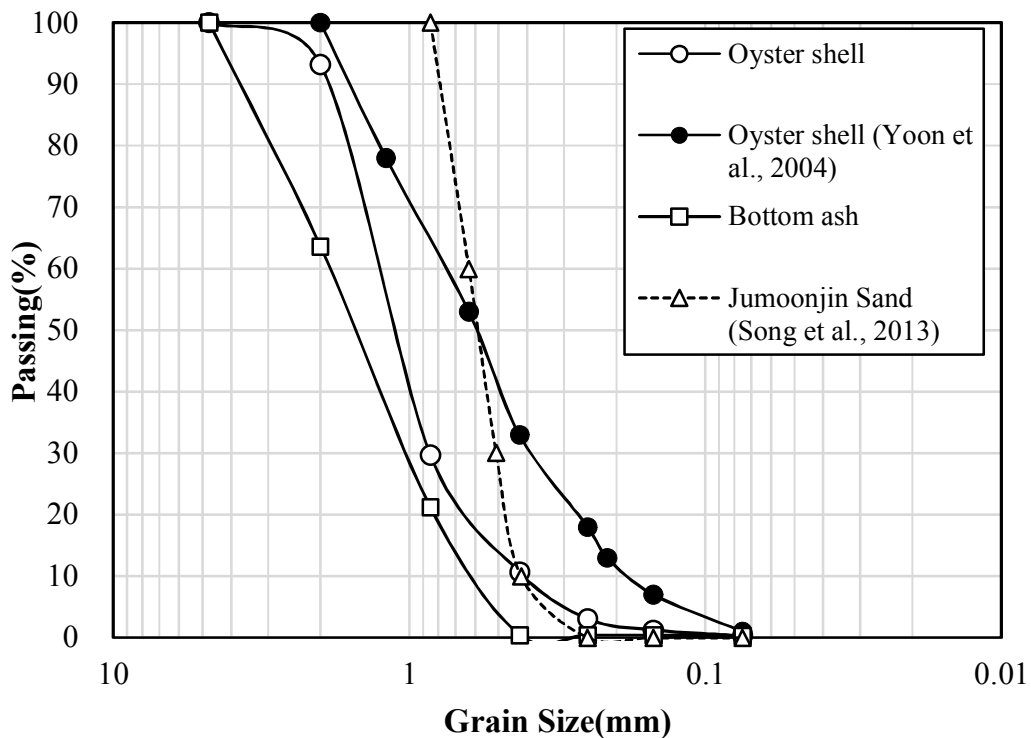


Fig 5.2 Particle size distribution of materials

Fig 5.3에서, 화살표로 표시된  $D_{85}$ ,  $D_{15}$  (입도분포곡선 상에서 각각 누가 통과율 85%, 15%에 해당하는 입경) 범위와 하단의 회색 영역은 도로공사표준시방서에서 제시한 수평배수층 모래의 입도 기준에 해당한다. 본 연구에서 이용한 굴 패각 및 Bottom ash, 주문진 표준사는 이 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 추가로, 문헌조사를 통하여 해당 문헌에서 이용한 파쇄 굴 패각의 입도분포를 함께 도시하였으며, 이 또한 수평배수층 모래의 입도 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 파쇄 조건이 상이함에 따라 본 연구에서 이용한 굴 패각과는 입도분포의 차이가 있는 것으로 나타났다.

수평배수층 재료로서 각 재료별 투수계수의 비교 및 기준 만족 여부를 평가한 결과, 다음 Table 5.2와 같이 굴 패각과 Bottom ash, 주문진 표준사는 서로 유사한 투수계수를 나타내며 수평배수층 재료 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5.2 Permeability coefficient (k) of materials

	k (cm/s)	Data source	수평배수층 재료
굴 패각	3.00E-02	실내시험	적합 ( $>1 \times 10^{-3}$ cm/s)
Bottom ash	3.29E-02		
Jumoonjin Sand	2.58E-02		

굴 패각과 Bottom ash가 세립질 지반의 배수 개선을 위한 배수재료로서 천연 모래를 대체하여 활용될 수 있는지 그 물리적 특성을 검토하였다. 세립토의 혼합 재료로 사용 시 세립토의 투수성 증가 효과가 자연 모래와 유사한 것으로 나타났으며, 각 재료의 입도분포 및 투수계수가 자연 모래와 유사할 뿐 아니라 수평배수층 모래의 재료 기준을 만족함에 따라 수평배수층 재료로서도 이용이 가능한 것으로 나타났다.

### 5.1.2 화학적, 환경적 특성 시험을 통한 적합성 평가

선정된 토양 및 굴 패각, Bottom ash의 XRF, XRD, 토양오염도 분석 결과는 다음 Table 5.3과 같다.

Table 5.3 The results of XRF, XRD, soil contamination analysis

	주요 구성 성분 (XRF)		주요 광물 (XRD)	토양오염도 평가 (mg/kg)							
				Cr <sup>6+</sup>	Cd	9	Hg	0.1	Zn	446	
Soil (화웅)	SiO <sub>2</sub>	67.0%	Quartz	Pb	0	As	4.5	Cu	7.6	Ni	122
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.6%									
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.0%									
굴 패각	LOI	52.0%	Calcite	Cr <sup>6+</sup>	0	Cd	0	Hg	0	Zn	21.4
	CaO	43.5%		Pb	7.1	As	0	Cu	2165	Ni	41.3
	Na <sub>2</sub> O	1.1%									
Bottom ash	SiO <sub>2</sub>	59.8%	Quartz	Cr <sup>6+</sup>	0	Cd	0	Hg	0	Zn	10.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.7%		Pb	5.4	As	0	Cu	42.2	Ni	9
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.1%									

XRF, XRD 분석결과, 굴 패각은 유기물 함량을 의미하는 강열감량 (LOI)이 약 52%으로 나타나 가장 큰 비율을 차지하였다. 이를 제외한 대부분의 성분은 CaO로 나타났으며, 주요 광물이 Calcite (방해석, 탄산칼슘)로 나타났다. 이는 분석 시의 가열로 인하여 굴 패각의 탄산칼슘 (CaCO<sub>3</sub>)이 소성을 거쳐 CaO로 변화하였기 때문이다. 이에 따라, CaO 성분비를 이용하여 굴 패각 내의 탄산칼슘 (CaCO<sub>3</sub>) 중량을 다음 식 (5-1)과 같이 간접적으로 계산할 수 있다.

$$\text{탄산칼슘 중량비 (\%)} = \frac{\text{CaCO}_3 \text{ 분자중량}}{\text{CaO 분자중량}} \times \text{CaO 중량비 (\%)} \quad (5-1)$$

식 (5-1)을 통하여 산출된 굴 패각의 탄산칼슘 중량비는 약 77.7 %이며, 유기물 등 이물질의 제거 상태가 양호할수록 이보다 더 높게 산출될 것으로 판단된다. 굴 패각은 높은 탄산칼슘 함량에 따라 약알칼리성을 나타내므로 혼합 시 토양의 pH 증가 영향을 예상할 수 있으며, 이에 따라 산성 토양에 이용 시 pH 개선 효과를 기대할 수 있다. Bottom ash는 주요 구성성분 및 주요 광물이 토양과 유사한 것으로 나타났으며, 토양에 비하여  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 다소 높은 것으로 측정되었다.

토양오염도 분석 결과, 굴 패각의 경우 Cu 오염 우려 기준을 다소 초과하는 것으로 나타났으며 다른 중금속 7종에 의한 오염 우려는 없는 것으로 측정되었다. 이에 따라, 굴 패각을 혼합재료로 이용 시 68.2% 이상 혼합물에서 Cu 오염 기준을 초과할 수 있으며, 그 이하로 혼합할 경우 중금속 오염 우려가 없는 것으로 나타났다. 또한, 수평배수층 재료로서 굴 패각을 이용하는 경우, 지반의 전용 등에 따른 배수층 폐기 시 Cu에 의한 오염 우려가 있으므로 이를 고려하여 처리하여야 할 것으로 사료된다. Bottom ash는 모든 분석 항목에 대하여 기준을 초과하지 않는 것으로 나타나 토양 혼합 및 수평배수층 재료로 이용 시 중금속에 의한 오염 우려가 없을 것으로 판단된다.

토양 혼합에 따른 토양 비옥도 영향 평가를 위한 재료별 CEC 측정 결과는 다음 Table 5.4와 같다.

Table 5.4 CEC of soil, oyster shell and bottom ash

	Soil (화웅)	굴 패각	Bottom ash
CEC (cmol/kg)	10.41	7.07	0.79

Bottom ash를 혼합 재료로 이용 시 혼합물이 과도하게 큰 경우 토양의 CEC (비옥도)를 낮출 우려가 있으므로 현장에 따라 토양의 CEC, 대상 작물의 생육 조건 등을 고려하여 혼합물을 결정하고, 유기질 비료의 시비를 검토하여야 할 것으로 판단된다.

굴 패각과 Bottom ash를 세립토 혼합 재료와 수평 배수층 재료로 이용하는 경우 각각에 대하여 평가 결과를 정리하면 다음과 같다.

혼합 재료로 이용하는 경우에 대하여, 굴 패각은 높은 혼합률에서 Cu 오염 우려가 있으므로 현장에서 혼합물 결정 시 이를 고려하여야 한다. 또한, 주성분인 탄산칼슘으로 인하여 약알칼리성을 띠게 되므로 혼합 재료로 이용 시 토양의 pH 증가 영향이 예상되므로 산성 토양에 적합한 것으로 나타났다. Bottom ash는 중금속에 의한 오염 우려는 없는 것으로 나타났으나, 혼합물을 과다하게 설정하는 경우 토양의 비옥도를 낮출 우려가 있으므로 이를 고려하여야 한다.

수평 배수층 재료로 이용하는 경우, 굴 패각으로 시공된 배수층을 폐기하는 단계에서 Cu 오염 우려가 있으므로 이를 고려하여 적절한 폐기가 이루어져야 할 것으로 사료되며, Bottom ash의 경우 환경적 오염 우려가 없는 것으로 평가되었다.

## 5.2 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산출

### 5.2.1 단위면적당 시공량 산출 결과

전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 평가를 위하여 각 재료 및 Case별 단위면적 (1m<sup>2</sup>) 시공에 따른 물량을 산출하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

#### 5.2.1.1 토양 혼합 재료

굴 패각 및 Bottom ash, 모래를 토양 혼합 재료로 이용하는 경우, 단위면적당 시공량은 다음 식 (5-2), (5-3)과 같은 두 조건을 연립하여 혼합률에 따른 수식으로 나타내었다.

$$\text{시공두께 (m)} = \text{재료포설두께 (m)} + \text{기존표토두께 (m)} \quad (5-2)$$

$$= \frac{\text{단위면적당 재료중량 (t/m}^2\text{)}}{\text{재료 단위중량 (t/m}^3\text{)}} + \frac{\text{단위면적당 표토중량 (t/m}^2\text{)}}{\text{표토 단위중량 (t/m}^3\text{)}} \leq 0.5 \text{ (m)}$$

$$x = \text{혼합률 (\%)} = \frac{\text{혼합재료 중량}}{\text{혼합재료 중량} + \text{표토 중량}} \times 100 \quad (5-3)$$

식 (5-2)는 로터베이터의 경심에 따른 시공두께가 포설된 혼합 재료의 두께와 기존의 표토두께의 합과 같다는 조건으로, 여기에서는 혼합 재료의 포설 직후 느슨한 상태의 단위중량과 표토의 본바닥 단위중량을 고려하였으므로 작업을 통한 체적변화가 없는 상태이다. 따라서, 앞에서 (4.2.2. 참조) 제시한 단위중량 값에는 변화가 없으므로 이를 그대로 적용하여 산출하였다. 또한, 본 연구에서 적용한 로터베이터의 최대 경심은 0.5m이므로 혼합두께 0.5m 이내의 경우만을 고려하여 산정하였다.

식 (5-3)의 경우 본 연구에서 적용한 혼합률의 정의로서 전체 혼합토의 중량에 대한 혼합재료의 중량 백분율을 이용하였다. 재료 별 혼합률

에 따른 단위면적 당 시공량 산출 결과는 다음 Table 5.5와 같고, Table 5.6 및 Table 5.7은 혼합두께 0.5m 조건에서 혼합물에 따른 시공량 예시로서 각각 중량, 부피 산출 결과이다.

Table 5.5 Amount of materials required for 1m<sup>2</sup> construction (Case 1)

		중량 (t)	부피 (m <sup>3</sup> )
Case 1 : 혼합	굴 패각	1.125x / (150+x)	1.25x / (150+x)
	Bottom ash	3x / (400+x)	2.5x / (400+x)
	모래	12x / (1600-x)	7.5x / (1600-x)

Table 5.6 Weight of materials for 1m<sup>2</sup> construction (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20	40	60	80	100
재료별 시공량 (t/m <sup>2</sup> )	굴 패각	0.13	0.24	0.32	0.39	0.45
	흙	0.53	0.36	0.21	0.10	0.00
	Bottom ash	0.14	0.27	0.39	0.50	0.60
	흙	0.57	0.41	0.26	0.13	0.00
	모래	0.15	0.31	0.47	0.63	0.80
	흙	0.61	0.46	0.31	0.16	0.00

Table 5.7 Volume of materials for 1m<sup>2</sup> construction (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20	40	60	80	100
재료별 시공량 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	굴 패각	0.08	0.15	0.20	0.24	0.28
	흙	0.33	0.22	0.13	0.06	0.00
	Bottom ash	0.09	0.17	0.24	0.31	0.38
	흙	0.36	0.26	0.16	0.08	0.00
	모래	0.09	0.19	0.29	0.39	0.50
	흙	0.38	0.29	0.19	0.10	0.00



### 5.2.1.2 수평배수층 재료

굴 패각 및 Bottom ash, 모래를 수평배수층 재료로 재활용하는 경우, 토양 혼합 재료로 이용되는 경우와 달리 혼합물의 개념이 필요하지 않으므로 단위면적당 시공량 시 다음의 시공두께 조건, 식 (5-4)만을 이용하여 산출되었다.

$$\text{시공두께} = \frac{\text{단위면적 당 재료중량}}{\text{재료 단위중량}} \quad (5-4)$$

즉, 수평배수층 재료로 재활용하는 경우에 대하여 각각의 재료별 단위면적 당 시공량 산출 시 시공 두께에 따른 수평배수층 부피에 각 재료별 단위중량을 나누어 얻을 수 있다. 배수층 두께 0.5m 당 재료별 시공량 산출 결과는 다음 Table 5.8과 같다.

Table 5.8 Amount of materials required for 1m<sup>2</sup> construction (Case 2)

	중량 (t)	부피 (m <sup>3</sup> )
굴 패각	0.45	0.50
Bottom ash	0.60	
모래	0.80	

## 5.2.2 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산출

본 연구에서 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량은 식 (5-5)에 따라 산정되었으며, 재료 및 Case에 따른 각 단계별 배출량을 산정하여 이를 합산하여 산출되었다. 이에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산출 결과는 각 Case별로 구분하여 후술하였다.

$$CO_2 \text{ Emissions } (E_{Sand}, E_{OS}, E_{BA}) = E_A + E_B + E_C \quad (5-5)$$

여기서,  $E_{sand}, E_{OS}, E_{BA}$ : 각 Case의 재료별 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_A$  : 획득 및 가공단계 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_B$  : 운송단계 CO<sub>2</sub> 배출량

$E_C$  : 시공단계 CO<sub>2</sub> 배출량

### 5.2.2.1 토양 혼합 재료

토양 혼합 재료로 이용되는 경우의 각 공정별 배출량  $E_A, E_B, E_C$  는 다양한 혼합률을 고려하기 위하여 Table 5.5의 재료별 시공량을 이용한 산정식으로 구성하였다. 이 시공량은 재료 종류에 따라 각각  $W_{OS}$  (굴패각, oyster shell),  $W_{BA}$  (bottom ash),  $W_{Sand}$  (sand)로 명명하고, t/m<sup>2</sup> 단위를 이용하였다. 각각의 재료에 따른 단위면적 (1m<sup>2</sup>) 당 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정식 도출 결과는 Table 5.9와 같다.

Table 5.9 Life cycle CO<sub>2</sub> emissions by materials (Case 1)

	$E_A$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E_B$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E_C$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
굴 패각	$1.784 W_{OS}$	$0.314 W_{OS} \times D$	$0.467 W_{OS} + 0.0045$
Bottom ash	$1.1 W_{BA}$	$0.314 W_{BA} \times D$	$0.350 W_{BA} + 0.0045$
모래	$3 W_{Sand}$	$0.314 W_{Sand} \times D$	$0.263 W_{Sand} + 0.0045$

Table 5.9에서,  $E_C$  산출식에 포함된 상수항 0.0045는 재료 혼합에 따른 트랙터 배출량으로서, 재료의 혼합률과 무관하게 시공 면적에 따라 증가하게 된다.

다음 Table 5.10, 5.11, 5.12는 각각 혼합 두께 0.5m 조건에서 상기 산정식에 따라 산출된 단위면적 (1m<sup>2</sup>) 당 혼합률별 시공량에 따른 재료의 획득 및 가공 단계 배출량 ( $E_A$ ), km당 운송단계 배출량 ( $E_B$ ), 시공단계 배출량 ( $E_C$ )를 나타낸 것이다.

Table 5.10  $E_A$  by materials and mixing ratio (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20%	40%	60%	80%	100%
$E_A$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	굴 패각	0.236	0.423	0.573	0.698	0.803
	Bottom ash	0.157	0.300	0.430	0.550	0.660
	모래	0.456	0.923	1.403	1.895	2.400

Table 5.11  $E_B/\text{km}$  by materials and mixing ratio (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20%	40%	60%	80%	100%
$E_B$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·km)	굴 패각	0.042	0.074	0.101	0.123	0.141
	Bottom ash	0.045	0.086	0.123	0.157	0.188
	모래	0.048	0.097	0.147	0.198	0.251

Table 5.12  $E_C$  by materials and mixing ratio (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20%	40%	60%	80%	100%
$E_C$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	굴 패각	0.057	0.103	0.145	0.181	0.215
	Bottom ash	0.055	0.100	0.141	0.180	0.215
	모래	0.044	0.085	0.127	0.171	0.215

다음 Table 5.13은 Table 5.10, Table 5.11, Table 5.12와 동일한 조건에서 운송거리가 40km인 경우에 대한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 결과 예시이며, 이를 그래프로 나타내면 Fig 5.3과 같다.

Table 5.13 Life cycle CO<sub>2</sub> Emissions by materials and mixing ratio (Case 1)

		혼합률 (%)				
		20%	40%	60%	80%	100%
$E$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	굴 패각	1.954	3.498	4.752	5.790	6.665
	Bottom ash	2.004	3.823	5.483	7.004	8.404
	모래	2.406	4.870	7.397	9.991	12.655

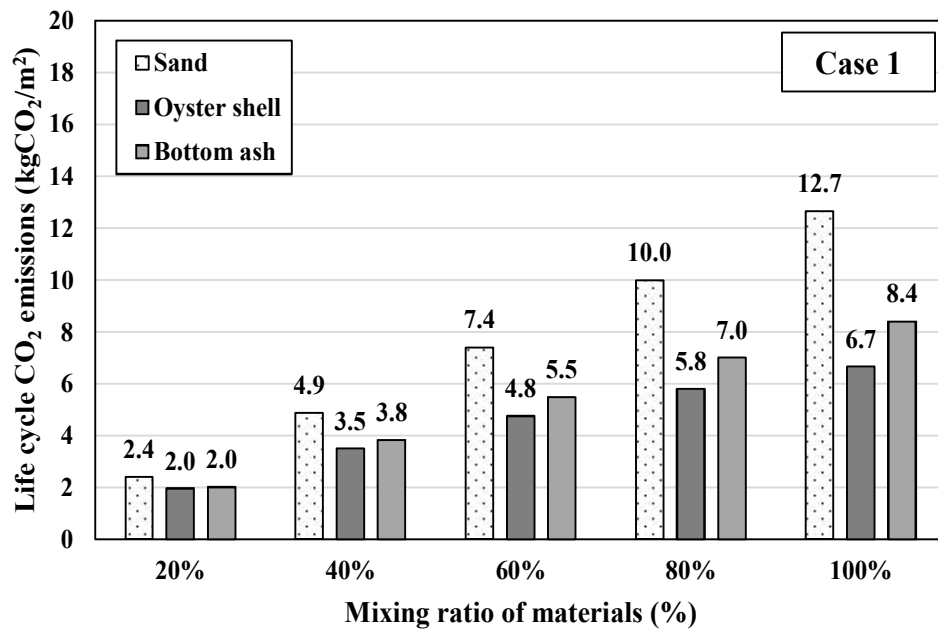


Fig 5.3 Life cycle CO<sub>2</sub> Emissions by materials and mixing ratio (Case 1)

### 5.2.2.2 수평배수층 재료

굴 패각, Bottom ash 및 모래가 수평배수층 재료로 이용되는 경우에 대한 각 공정별 배출량  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ 는 다양한 수평 배수층의 두께 및 깊이, 시공면적을 고려하기 위하여 톤 단위의  $W_{OS}$ ,  $W_{BA}$ ,  $W_{Sand}$  및  $d$  (depth, m),  $T$  (thickness, m)를 이용한 산정식으로 구성하였다. 각각의 재료에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정식 도출 결과는 Table 5.14와 같다.

Table 5.14 Life cycle CO<sub>2</sub> emissions by materials (Case 2)

	$E_A$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E_B$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E_C$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
굴 패각	$1.784 W_{OS}$	$0.314 W_{OS} \times D$	
Bottom ash	$1.1 W_{BA}$	$0.314 W_{BA} \times D$	$5.098d + 0.420 T$
모래	$3 W_{Sand}$	$0.314 W_{Sand} \times D$	

위 Table 5.14에서,  $E_C$  산출식에 포함된  $5.098d$ 는 표토 제거 및 복토 등 토공사에 의한 배출량이므로 배수층 재료에 따른 차이가 나타나지 않는다. 재료 포설에 의한 배출량인  $0.420T$  항의 경우, 표준 품셈의 작업시간 산정식을 이용한 작업시간 산정 시 재료의 입경에 따른 분류를 반영하여 버킷 계수, 작업 효율, 체적 변화율 등을 적절히 설정하게 된다. 여기에서 폐콘크리트를 제외한 재활용 재료에 대한 조건이 정립되어 있지 않으므로, 이러한 조건 설정 시 자연 모래와 굴 패각, Bottom ash의 물리적 유사성을 고려하여 모래로 가정하여 작업시간 계산에 이용하였으므로 배수층 재료에 따른 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다. 실제 현장에서는 동일한 부피 조건일지라도 단위중량이 더 큰 재료 시공 시 건설 장비의 효율 저하가 예상되므로, 실제 배출량은 모래보다 단위중량이 작은 굴 패각, Bottom ash 시공 시 더 작게 나타날 것으로 판단된다.

다음 Table 5.15는 배수층 두께 0.5m, 깊이 0.5m 조건에서 상기 산정식에 따라 산출된 단위면적 (1m<sup>2</sup>) 당 시공량에 따른 재료의 획득 및 가공 단계 배출량 ( $E_A$ ), km당 운송단계 배출량 ( $E_B$ ), 시공단계 배출량 ( $E_C$ ) 및 운송거리 40km에 대한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 ( $E$ )을 나타낸다.

Table 5.15  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$ ,  $E$  by materials (Case 2)

	$E_A$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E_B$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ·km)	$E_C$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	$E$ (kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )
굴 패각	0.803	0.141	2.759	9.214
Bottom ash	0.660	0.188	2.759	10.955
모래	2.400	0.251	2.759	15.207

Table 5.15에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산출 결과를 Table 5.13의 산출결과와 비교하면, 수평배수층 시공 시 동일 두께 토양 혼합보다 많은 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 시공 두께 조건에서 현장의 표토를 함께 이용하는 혼합 시보다 수평 배수층 시공 시의 시공량이 많기 때문이며, 혼합률 100%인 경우와 비교하더라도 더 복잡한 시공공정으로 인하여 더 많은 배출량을 나타낸다. 다음 Fig 5.4는 운송거리 40km 조건 하에서 다양한 시공 깊이와 두께를 고려하여 산정된 재료별 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 그래프로 나타낸 것이다.

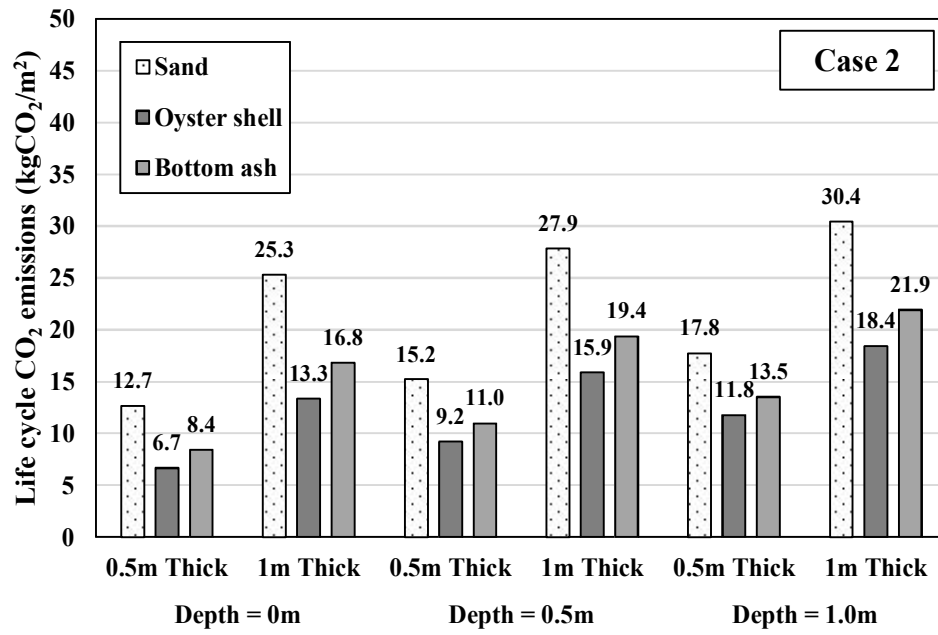


Fig 5.4 Life cycle CO<sub>2</sub> emissions by construction conditions (Case 2)



### 5.2.3 재활용에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과

굴 패각과 Bottom ash의 재활용에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 동일한 조건에서의 모래 이용에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교하여 재활용 재료 이용 시의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 기존에 선정된 Case에 따라 분석하였다.

#### 5.2.3.1 토양 혼합 재료

굴 패각과 Bottom ash를 토양 혼합 재료로 이용하는 경우 (Case 1)에 대하여 산출된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 같은 혼합률 조건의 모래 사용 시와 비교하고, 다음 Fig 5.5와 같이 재활용 재료 이용에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축 효과를 확인하였다. 분석에 이용된 전과정 배출량의 산출 조건은 혼합두께 0.5m, 운송거리 40km로 모든 재료에 대하여 동일하게 적용하였으며, 배출량의 감축효과는 동일 혼합률 조건에서 모래 이용에 따른 배출량에 대한 재활용 재료 이용 시 감소비율을 이용하였다.

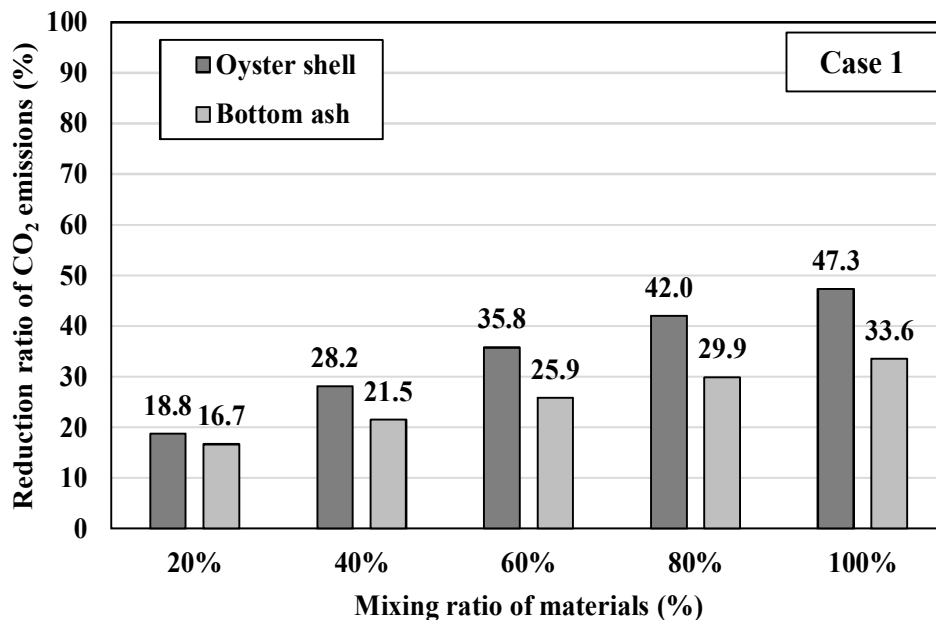


Fig 5.5 Reduction ratio of Life cycle CO<sub>2</sub> emissions (Case 1)

Fig 5.5에서, 굴 패각과 Bottom ash를 모래 대체 재료로 이용하여 토양 혼합을 수행하는 경우 각각 19 ~ 47%, 17 ~ 34%의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량의 감축 효과를 나타내었다. 또한, 각 재료에 대한 배출량 및 감축효과 증가율은 혼합률과 정비례하지는 않는 것으로 나타났다. 이는 비록 앞에서 제시한 Case 1 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정식이 각 재료별 시공량에 따른 일차함수로 나타나지만, 이 시공량은 혼합물에 대하여 분수함수 관계를 갖기 때문에 발생하는 경향인 것으로 분석할 수 있다.

### 5.2.3.2 수평배수층 재료

굴 패각과 Bottom ash를 수평배수층 재료로 이용하는 경우 (Case 2)에 대하여 산출된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 같은 시공 두께, 깊이 조건에서의 모래 사용 시와 비교하였다. 또한, 다음 Fig 5.6과 같이 굴 패각, Bottom ash의 수평배수층 재료 이용에 따른 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 시공 깊이 (0m, 0.5m, 1m), 두께 (0.5m, 1m) 별로 분석하였다.

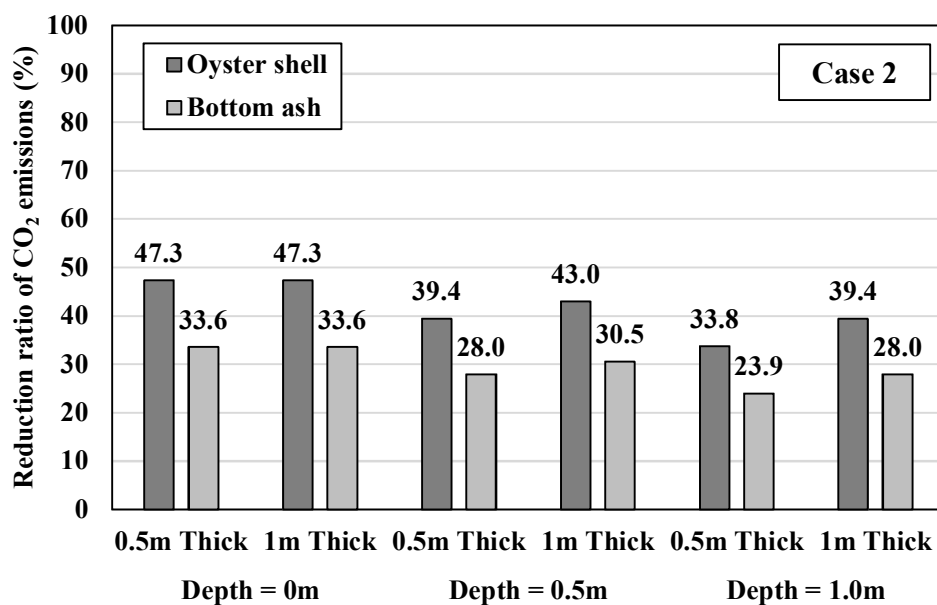


Fig 5.6 Reduction ratio of Life cycle CO<sub>2</sub> emissions (Case 2)

Fig 5.6에서, 수평배수층의 시공 깊이가 증가할수록 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 내에서 고려한 토공사 (표토 제거 및 복토) 로 인한 배출량이 증가하게 되므로 재활용 재료의 활용에 따른 감축효과가 감소하게 된다. 반면, 시공두께가 증가할수록 감축효과가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 시공량 증가에 따른 각 재료별  $E_A$ ,  $E_B$ 의 증가폭이 모래, Bottom ash, 굴 패각 순으로 크게 나타나기 때문에 발생하는 현상이다. 즉, 시공두께가 증가할 수록 시공량이 증가하게 되고, 이로 인하여 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량의 재료 간 차이가 더욱 커지게 된다.

## 5.3 CO<sub>2</sub> 배출량에 따른 재료의 재활용성 평가

### 5.3.1 모래 운송거리에 따른 재활용성

굴 패각과 Bottom ash를 모래 대체재로서 재활용하기 위해서는 천연 모래 이용시의 배출량보다 적은 값을 나타내어 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 우위를 확보하여야 한다. 그러나, 실제 현장에서 천연 모래의 수급 거리는 현장에 따라 상이하게 나타나며, 모래의 운송거리에 따라 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량이 다르게 산출된다. 따라서, 굴 패각, Bottom ash의 재활용성도 현장의 위치와 모래의 운송 거리에 따라 변화하게 된다.

따라서, 굴 패각과 Bottom ash가 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 모래 이용시보다 우위를 갖는 최대 운송거리를 모래 운송거리에 따라 산출, 제시하였다. 각 재료의 최대 운송거리는 이용 목적 (Case 1, 2)을 고려하여 각각 산출하였다.

다음 Fig 5.7, Fig 5.8, Table 5.16은 혼합 재료 이용 시 (Case 1), 모래의 운송거리에 따른 굴 패각, Bottom ash의 최대운송거리 산출 결과를 혼합물에 따라 각각 제시한 것이다.

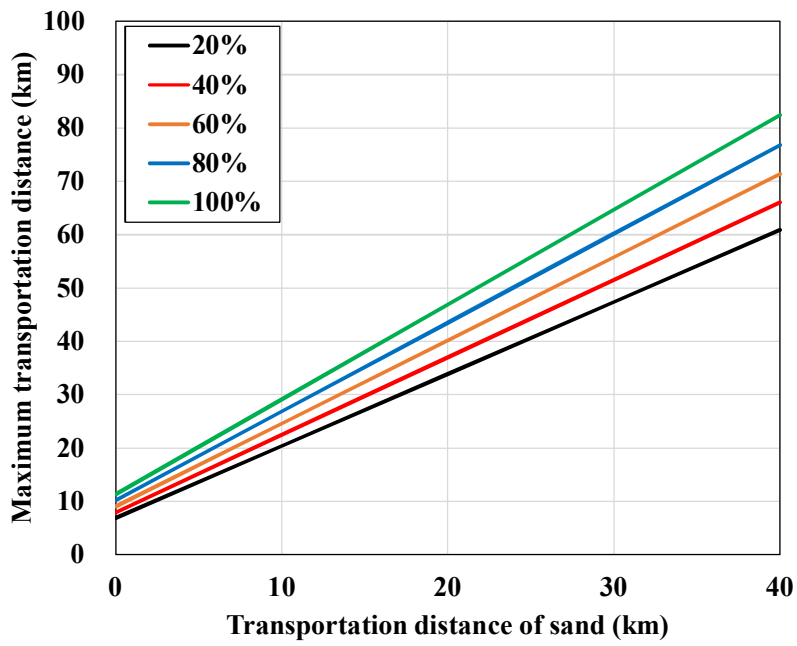


Fig 5.7 Maximum transportation distance of oyster shell (Case 1)

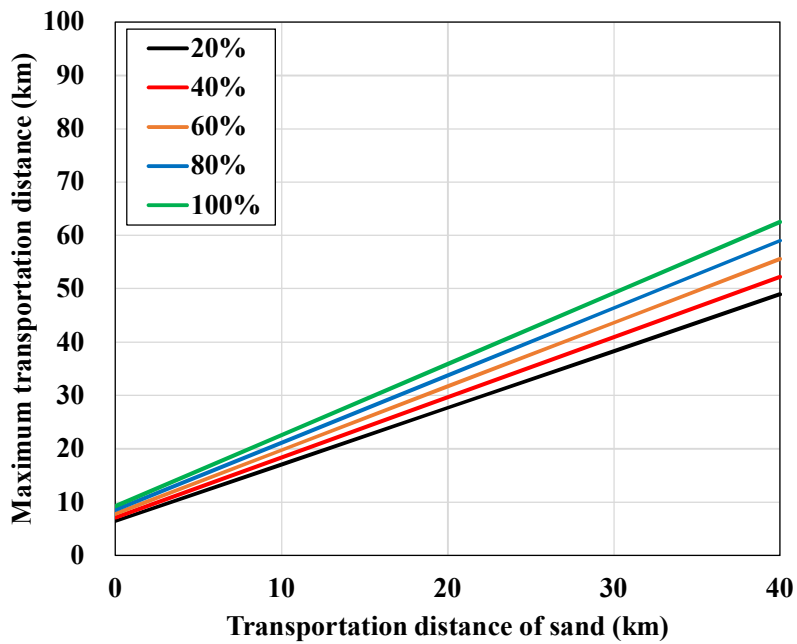


Fig 5.8 Maximum transportation distance of bottom ash (Case 1)

Table 5.16 Maximum transportation distance of materials (Case 1)

재료 최대 운송거리 (km)	혼합률	모래의 운송거리 (km)				
		0	10	20	30	40
굴 패각	20%	6.86	20.36	33.87	47.37	60.87
	40%	7.93	22.46	36.99	51.52	66.05
	60%	9.03	24.61	40.19	55.78	71.36
	80%	10.15	26.82	43.48	60.15	76.82
	100%	11.31	29.08	46.86	64.64	82.42
Bottom ash	20%	6.43	17.06	27.70	38.33	48.96
	40%	7.11	18.39	29.67	40.95	52.23
	60%	7.80	19.75	31.69	43.64	55.59
	80%	8.51	21.14	33.77	46.40	59.03
	100%	9.24	22.57	35.90	49.24	62.57

굴 패각과 Bottom ash를 혼합 재료로 이용하는 경우, 현장의 모래 수급거리가 증가함에 따라 재료의 재활용성이 증가하며, 혼합률의 증가에 따라 최대운송거리가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 동일 혼합두께에 대하여 모래의 단위중량이 굴 패각 및 Bottom ash보다 크므로 혼합률 증가에 따른 시공 중량의 증가가 모래 이용시 가장 크게 나타나기 때문이다. 이에 따라 혼합률 증가에 따른 시공량 증가율이 모래, Bottom ash, 굴 패각 순으로 크게 나타나게 되며 혼합률이 커질수록 모래 이용시의 배출량 증가 폭이 타 재료보다 더 크게 증가하게 된다.

다음 Fig 5.9, Table 5.17은 수평배수층 재료 이용 시 (Case 2), 모래의 운송거리에 따른 굴 패각, Bottom ash의 최대운송거리 산출 결과를 각각 제시한 것이다.

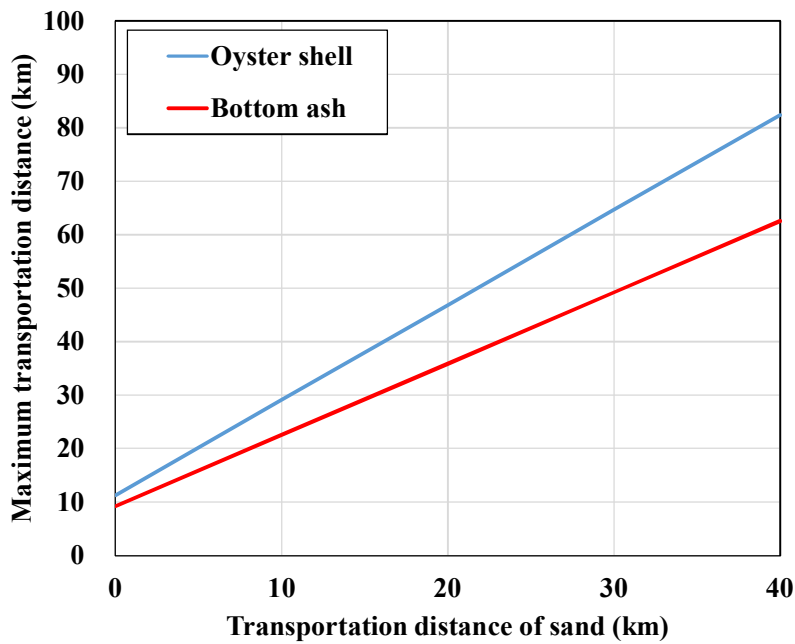


Fig 5.9 Maximum transportation distance of materials (Case 2)

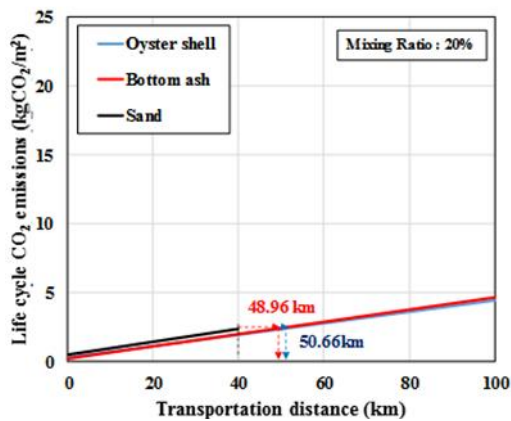
Table 5.17 Maximum transportation distance of materials (Case 2)

재료 최대 운송거리 (km)	모래의 운송거리 (km)				
	0	10	20	30	40
굴 패각	11.30	29.08	46.86	64.64	82.41
Bottom ash	9.24	22.57	35.90	49.24	62.57

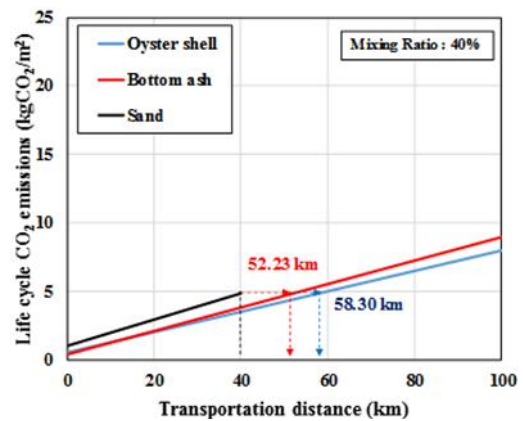
굴 패각과 Bottom ash를 수평 배수층 재료로 이용하는 경우, 혼합 재료 이용 시와 마찬가지로 모래 운송거리가 증가함에 따라 모래 이용 시와 동일한 배출량을 나타내는 재료 운송거리가 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 현장에서 획득할 수 있는 모래가 멀리 있을수록, 굴 패각과 Bottom ash를 재활용하여 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과를 나타낼 수 있는 재료의 운송거리가 증가하게 된다.

### 5.3.2 재활용 재료의 최대 운송거리 산출

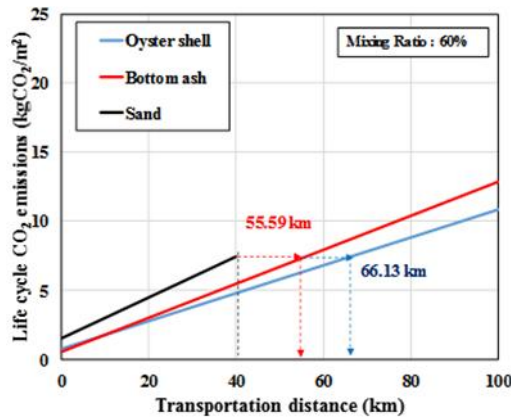
다음 Fig 5.10은 굴 패각을 혼합재료로 이용하는 경우 (Case 1)에 대하여 혼합 두께 0.5m 조건에서 산출된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 운송거리에 따라 나타내고, 이를 이용한 재활용 재료 (굴 패각, Bottom ash) 각각의 최대 운송거리 산출 과정 및 결과를 재료의 혼합률 별로 나타낸 것이다.



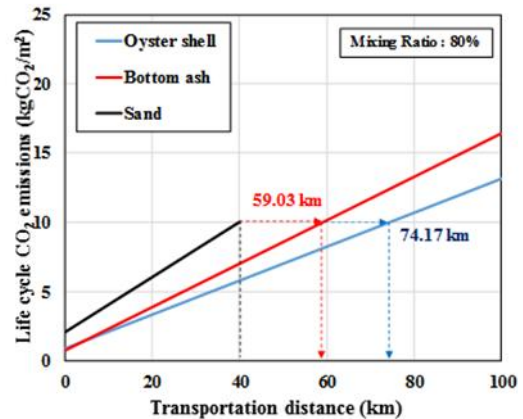
(1) 혼합률 20%



(2) 혼합률 40%

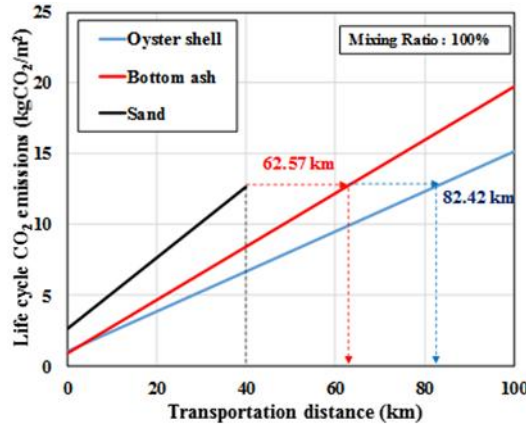


(3) 혼합률 60%



(4) 혼합률 80%





(5) 혼합률 100%

Fig 5.10 Life cycle CO<sub>2</sub> emissions according to transportation distance (Case 1)

굴 패각 및 Bottom ash의 최대운송거리는 혼합률이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 최대운송거리의 산정 과정을 통하여 원인을 분석할 수 있으며, 최대 운송거리의 산정 방법을 식으로 나타내면 다음 식 (5-6)과 같다.

$$E_{Sand\_40km} = E_{OS\_D_{OS, max}} = E_{BA\_D_{BA, max}} \quad (5-6)$$

여기서,  $D_{OS, max}$  및  $D_{BA, max}$ 는 각각 굴 패각과 Bottom ash의 최대 운송거리이다. 위 식 (5-6)은 재료별로 동일한 혼합률과 혼합 두께 조건에서, 모래의 최대운송거리인 40km에서의  $E_{Sand}$ 와  $D_{OS, max}$  및  $D_{BA, max}$ 에서의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량이 같다는 의미이다. 식 (5-6)에 Case 1의 공정별 배출량 산정 결과를 대입, 정리하면 다음 식 (5-7)과 같다.

$$15.823 W_{Sand} = \begin{cases} (2.251 + 0.314 D_{OS, max}) W_{OS} \\ (1.450 + 0.314 D_{BA, max}) W_{BA} \end{cases} \quad (5-7)$$

식 (5-7)을  $D_{OS, max}$  및  $D_{BA, max}$ 에 대하여 각각 정리하면 다음 식 (5-8), 식 (5-9)와 같다.

$$D_{OS, \max} = (\frac{15.823 W_{Sand}}{W_{OS}} - 2.251)/0.314 \quad (5-8)$$

$$D_{BA, \max} = (\frac{15.823 W_{Sand}}{W_{OS}} - 1.450)/0.314 \quad (5-9)$$

위 식 (5-7), (5-8)에서, 재활용 재료의 최대운송거리를 변화시키기 위해서는 모래와 재활용 재료의 시공량이 서로 다른 변화율로 변화하여야 한다. 본 연구에서 정의된 혼합물의 증가에 대한 재료별 시공량의 변화율이 재료별 단위중량에 따라 상이하기 때문에 혼합물 증가 시 최대 운송거리가 변화하게 된다.

Fig 5.11과 Table 5.18은 Case 1 (두께 0.5m) 혼합물에 따른 굴 패각과 Bottom ash의 최대 운송거리 변화를 나타낸 것이다.

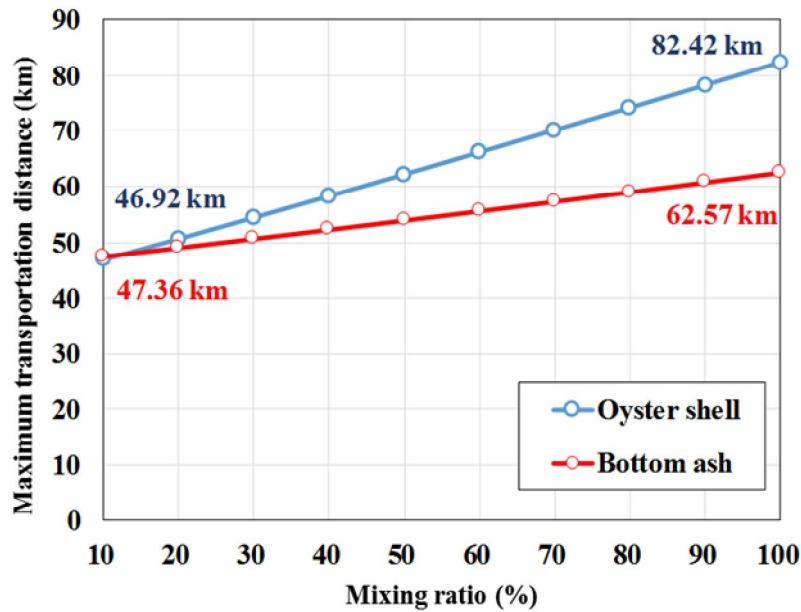
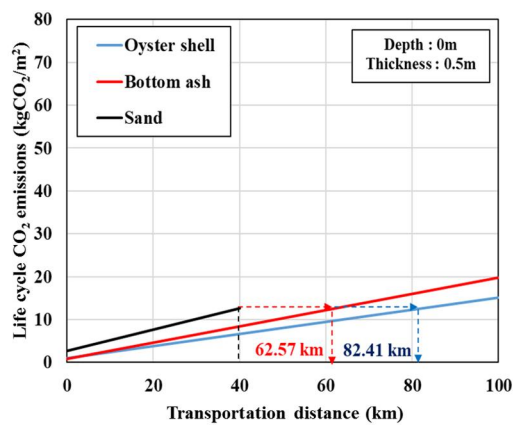


Fig 5.11 Maximum transportation distance of materials (Case 1)

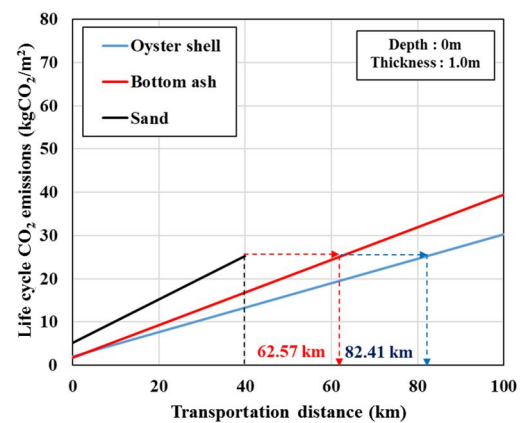
Table 5.18 Maximum transportation distance of recycled materials (Case 1)

혼합률 (%)	최대운송거리 (km)	
	굴 패각	Bottom ash
10	46.92	47.36
20	50.66	48.96
30	54.46	50.59
40	58.30	52.23
50	62.19	53.90
60	66.13	55.59
70	70.12	57.30
80	74.17	59.03
90	78.26	60.79
100	82.42	62.57

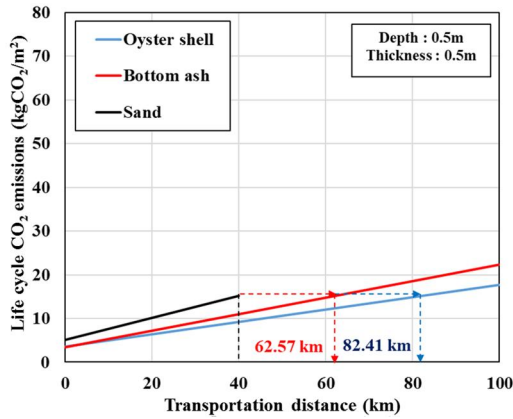
Case 1과 마찬가지로, 굴 패각을 수평배수층 재료로 이용하는 경우 (Case 2)에 대하여 재료별 최대운송거리를 산정하였다. Fig 5.12는 Case 2에 대하여 산출된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 운송거리에 따라 나타내고, 이를 통한 최대운송거리의 산출 과정 및 결과를 다양한 시공 깊이 (0, 0.5, 1m) 및 두께 (0.5m, 1m) 조건에 따라 나타낸 것이다.



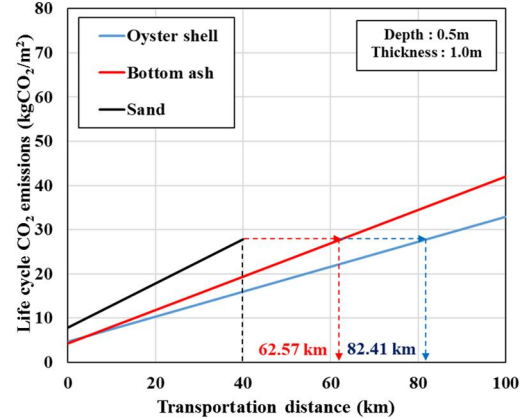
(1) 시공 깊이, 두께 : 0m, 0.5m



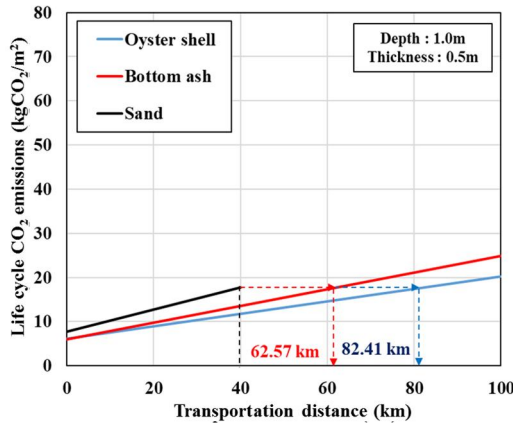
(2) 시공 깊이, 두께 : 0m, 1.0m



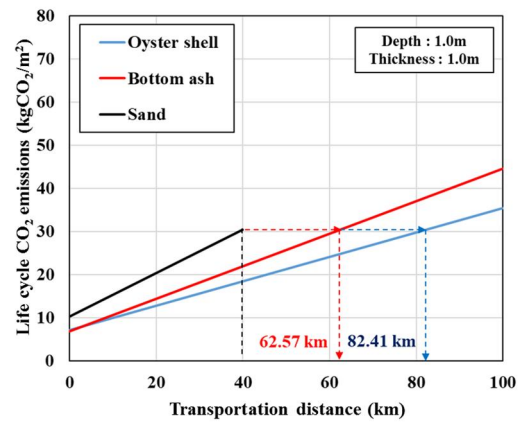
(3) 시공 깊이, 두께 : 0.5m, 0.5m



(4) 시공 깊이, 두께 : 0.5m, 1.0m



(5) 시공 깊이, 두께 : 1.0m, 0.5m



(6) 시공 깊이, 두께 : 1.0m, 1.0m

Fig 5.12 Maximum transportation distance of materials (Case 2)

Fig 5.12에서, 시공 깊이 및 두께 변화에 따라 최대운송거리의 변화는 없는 것으로 나타났으며, 그 원인은 Case 1에서와 마찬가지로 재료별 최대운송거리 산정 방법을 정리하여 분석할 수 있다.

이는 최대운송거리의 산정 과정을 통하여 원인을 분석할 수 있으며, 최대 운송거리의 산정 방법을 식으로 나타내면 앞에서 제시된 식 (5-7)과 동일하며, 여기에 Case 2의 공정별 배출량 산정 결과를 대입, 정리하면 다음 식 (5-10)과 같다.

$$15.56 W_{Sand} = \begin{cases} (1.784 + 0.314 D_{OS, \max}) W_{OS} \\ (1.1 + 0.314 D_{BA, \max}) W_{BA} \end{cases} \quad (5-10)$$

식 (5-10)을  $D_{OS, \max}$  및  $D_{BA, \max}$ 에 대하여 각각 정리하면 다음 식 (5-11), 식 (5-12)와 같다.

$$D_{OS, \max} = (\frac{15.56 W_{Sand}}{W_{OS}} - 1.784) / 0.314 \quad (5-11)$$

$$D_{BA, \max} = (\frac{15.56 W_{Sand}}{W_{OS}} - 1.1) / 0.314 \quad (5-12)$$

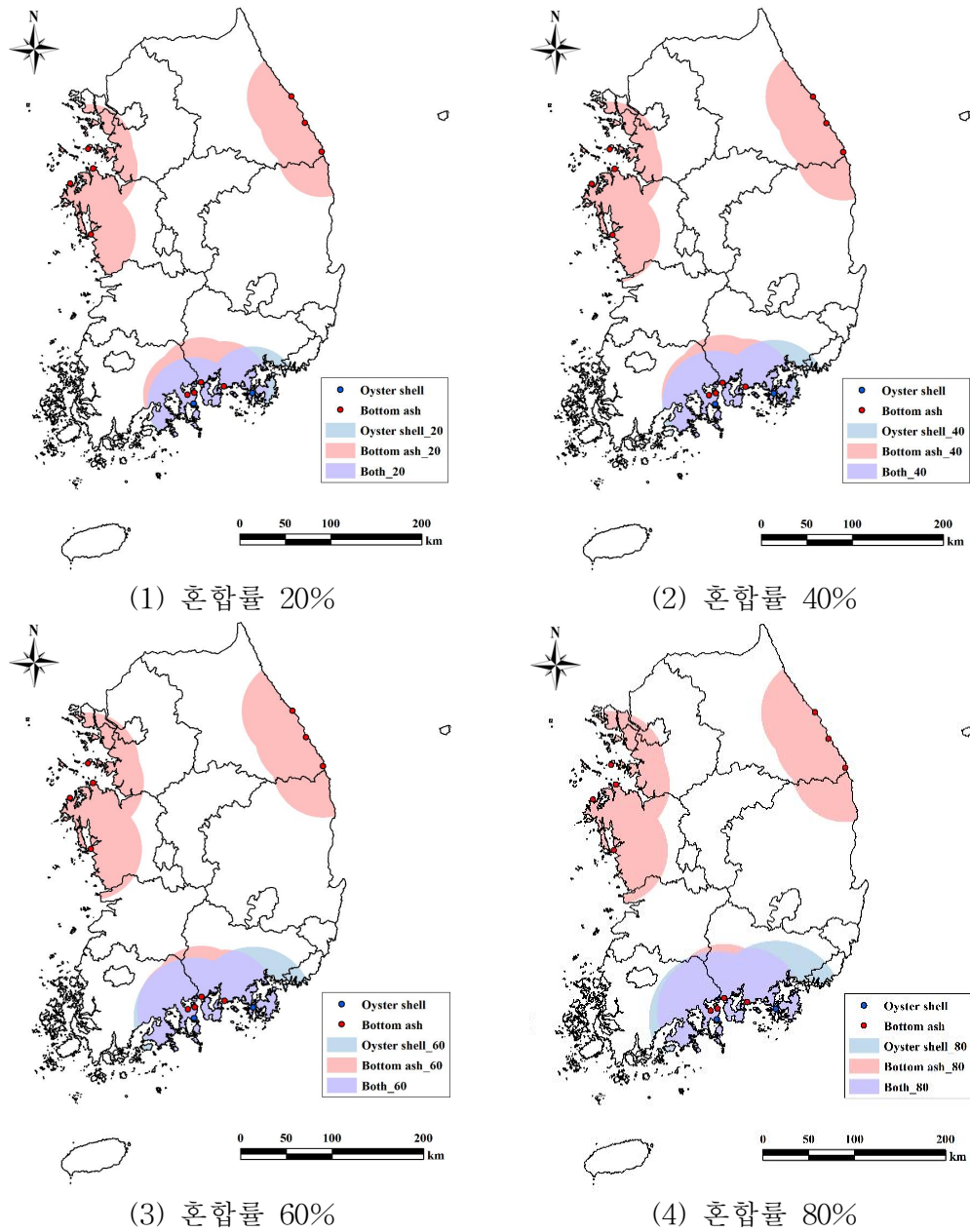
위 식 (5-11), (5-12)에서, 재활용 재료의 최대운송거리를 변화시키기 위해서는 모래와 재활용 재료의 시공량이 서로 다른 변화율로 변화하여야 한다. 그런데, 시공 깊이에 따라서는 배수층 재료의 시공량이 변화하지 않고, 시공 두께에 따라서는 모래와 재활용 재료의 시공량이 동일한 비율로 변화하게 되므로, 굴 패각 및 Bottom ash의 최대 운송거리 산출 결과에는 영향을 주지 않는다. 이에 따라, 굴 패각 및 Bottom ash의 최대 운송거리는 다음 Table 5.19와 같이 산출되었다.

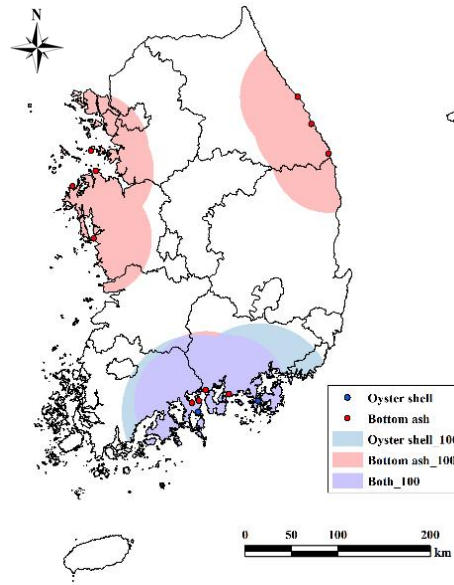
Table 5.19 Maximum transportation distance of recycled materials (Case 2)

최대운송거리 (km)	굴 패각	Bottom ash
Case 2 : 수평 배수층	82.41	62.57

### 5.3.3 매핑을 통한 재활용성 평가

산출된 굴 패각, Bottom ash의 발생원으로부터 최대 운송 거리 이내의 범위를 국내 지도에 적용하여 Mapping을 수행하였으며, 그 결과는 Case 별로 각각 Fig 5.13, Fig 5.14와 같다.





(5) 혼합률 100%

Fig 5.13 Application range maps for oyster shell, bottom ash (Case 1)

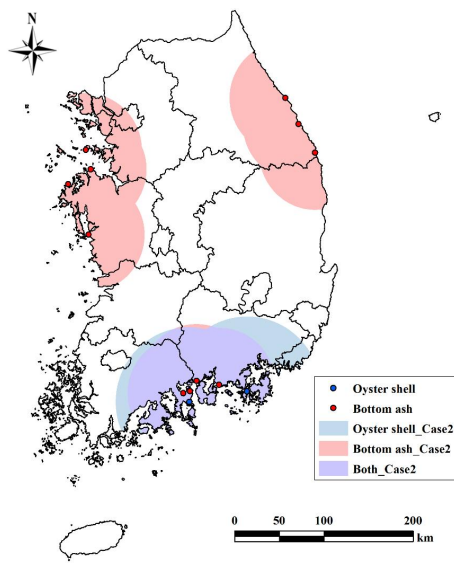


Fig 5.14 Application range map for oyster shell, bottom ash (Case 2)

최대 운송거리는 굴 폐각이 Bottom ash보다 모든 경우에서 더 크게 산출되었으나, Mapping 결과 굴 폐각 발생지가 남해안에 집중되어 있어 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서의 적용 가능 면적이 더 좁은 것으로 산정되었다.

굴 폐각 및 Bottom ash를 모두 이용할 수 있는 지역 또한 인근에 굴 폐각 발생지 2개소와 화력발전소 4개소가 위치하고 있는 남해안인 것으로 나타났으며, 통영, 여수 이외에 실제로 굴 폐각 폐기물이 발생되고 있는 지역들을 고려한다면 적용성이 더욱 크게 산출될 것으로 사료된다.

제시된 Fig 5.13, Fig 5.14 내의 각 영역 면적 및 국토 비율을 계산하였으며, 그 결과는 다음 Table 5.20, Table 5.21과 같다.

Table 5.20 Recycability evaluation result of materials (Case 1)

혼합률 (%)	굴 폐각 (km <sup>2</sup> , %)	Bottom ash (km <sup>2</sup> , %)	굴 폐각 + Bottom ash (km <sup>2</sup> , %)
20	6,136 (6%)	21,510 (21%)	5,359 (5%)
40	7,894 (8%)	23,835 (24%)	6,788 (7%)
60	9,885 (10%)	26,275 (26%)	8,156 (8%)
80	12,111 (12%)	28,827 (29%)	9,354 (9%)
100	14,663 (15%)	31,461 (31%)	10,486 (10%)

Table 5.21 Recycability evaluation result of materials (Case 2)

굴 폐각 (km <sup>2</sup> , %)	Bottom ash (km <sup>2</sup> , %)	굴 폐각 + Bottom ash (km <sup>2</sup> , %)
14,660 (15%)	31,461 (31%)	10,486 (10%)



굴 패각 및 Bottom ash를 혼합 재료로 이용하는 경우, 굴 패각은 국토의 약 6~14%, Bottom ash는 국토의 21~31%에 해당하는 지역에 모래를 대체하여 이용할 때 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축 효과를 나타낼 수 있는 것으로 산출되었다. 이들 재료를 수평배수층 재료로 재활용하는 경우 (Case 2), 굴 패각은 국토의 약 15%, Bottom ash는 약 31%에 해당하는 면적에서 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 효과를 나타내는 것으로 나타났으며, 두 재료 모두 이용할 수 있는 면적은 약 10%로 산정되었다.

## 제 6 장 요약 및 결론

본 연구에서는 배수 불량 지반의 배수성 개선을 위한 혼합, 수평배수층 재료로서 폐기물로 취급되는 굴 폐각과 Bottom ash의 물리, 화학, 환경적 적합성 평가를 수행하였다. 또한, 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 통한 정량적 환경성 평가를 수행하였으며, 이를 토대로 국내 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 혼합재료로서 굴 폐각과 Bottom ash의 적합성 평가 결과, 대상 재료를 세립질 토양에 혼합 시 그 투수계수 증가효과가 모래와 유사한 것으로 나타났다. 현장 토양 및 혼합 재료의 특성에 따라 투수성 증진 효과의 정량적 비교가 어려우므로 이후 환경성 평가 시 다양한 혼합률을 고려하였다. 한편, 현장 혼합물 선정 시 굴 폐각의 높은 Cu 함량과 Bottom ash의 낮은 CEC를 고려하여야 할 것으로 판단된다.
2. 수평배수층 재료로서 굴 폐각과 Bottom ash의 적합성 평가 결과, 대상 재료의 입도분포와 투수계수가 모래와 유사할 뿐만 아니라 수평배수층에 이용되는 모래 기준을 만족하여, 굴 폐각과 Bottom ash를 수평배수층 재료로 이용할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 굴 폐각의 경우 배수층 폐기 시 Cu에 의한 오염이 발생하지 않도록 고려하여야 하는 것으로 나타났다.
3. 굴 폐각 및 Bottom ash를 혼합 재료, 수평배수층 재료로 이용하는 경우 각각에 대하여 재료의 획득 및 가공, 운송, 시공을 고려한 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 산출하였다. 이 때, 혼합 재료로 이용 시의 혼합물 및 수평배수층 재료로 이용 시 시공 깊이와 두께를 고려하였다. 동일한 혼합물 또는 배수층 두께, 깊이 조건에서 굴 폐각과 Bottom ash는 모래보다 낮은 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 나타내었으며, 이에 따라 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 감축효과가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 산출된 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량을 토대로 재료의 Case별 최대 운송거리를 산정하였으며, 이는 모래 운송의 경제성을 고려한 최대 운송거리 40km에서의 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량과 동일한 배출량을 나타내는 각 재료별 운송거리를 계산하여 산출하였다. 혼합 재료로 이용하는 경우 혼합률에 따라 최대 운송거리가 증가하는 것으로 나타났으며, 수평 배수층 재료로 이용하는 경우에 대한 재료별 최대 운송거리는 배수층의 깊이와 두께에 무관한 것으로 나타났다.
5. 대상 재료의 적용성을 평가하기 위하여, 산출된 Case별 재료 최대운송범위를 굴 패각과 Bottom ash의 주요 발생원에 따른 적용 가능 지역 Mapping을 수행하고, 재료별 적용 가능 면적을 산출하였다. 이를 국토 면적 내의 비율로 환산하여 분석한 결과, 굴 패각 및 Bottom ash를 혼합재료로 이용하는 경우 각각 국토의 약 6~14 %, 21~31 %에 해당하는 면적에서 모래 이용 시보다 전과정 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 유리한 것으로 나타났으며, 굴 패각과 Bottom ash를 모두 적용 가능한 지역의 면적도 약 5~10%로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Alvarenga, R.A.F., Galindro, B.M., de Fátima Helpa, C., Soares, S.R., 2012. The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. *Journal of environmental management* 106, 102–109.
2. Chiu, C.T., Hsu, T.H., Yang, W.F., 2008. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. *Resources, conservation and recycling* 52, 545–556.
3. Curran, M.A., 1996. Environmental life-cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 1, 179–179.
4. Ez-Zaki, H., Diouri, A., Kamali-Bernard, S., Sassi, O., 2016. Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. *Materiales de construcción* 66, 080.
5. Hara, M., Sugi, S., Prachankanchana, S., 2002. Cutting-off zone technique for crop production in salt affected area of Northeast Thailand, 17. *World congress of soil science*, Bangkok (Thailand), 14–21 Aug 2002.
6. Huang, Y., Bird, R., Bell, M., 2009. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14, 197–204.
7. Iribarren, D., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2010. Implementing by-product management into the life cycle assessment of the mussel sector. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1219–1230.
8. Kim, T., Shin, Y., Lee, J., Suh, K., 2013. Calculation of regional circuitry factors using road network distance in South Korea. *J. Korea Plan. Assoc* 48, 319–329 (in Korean).

9. Koh, T.H., Lee, S.J., Shin, M.H., Kim, B.S., Lee, J.K., Lee, T.Y., 2010. Evaluation for contents of contaminants and leaching characteristics of bottom ash. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society* 11, 77–83.
10. Kwon, H.B., Lee, C.W., Jun, B.S., Weon, S.Y., Koopman, B., 2004. Recycling waste oyster shells for eutrophication control. *Resources, Conservation and Recycling* 41, 75–82.
11. Lee, S.C., Woo, S.G., An, Y.D., Jun, H.S., Koo, H.S., 2007. An Experimental Study on the Structural Characteristics of Reinforced Concrete Beams Containing Oyster Shells. *KIEAE Journal* 7, 135–142 (in Korean).
12. McCarthy, D.F., 1982. *Essentials of soil mechanics and foundations*. 2nd ed. Reston Publishing Company Virginia.
13. Mikami, K., Okumura, T., 2007. Underwater soil improvement for port facilities by compaction piles of oyster shell–sand mixture, 2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, IEEE, pp. 66–75.
14. Moulton, L.K., 1973. Bottom ash and boiler slag, *Proceedings: Third International Ash Utilization Symposium*. Sponsored by National Coal Association, Edison Electric Institute, American Public Power Association, National Ash Association, and Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa., March 13–14, 1973.
15. Mroueh, U.-M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., 2001. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste management* 21, 271–277.
16. Noh, S., Son, Y., 2017. Substitution effects of forest aggregates for bottom ash based on the economic value for forestry and carbon dioxide emissions. *Journal of cleaner production* 141,

1178-1185.

17. Noh, S., Son, Y., Yoon, T., Bong, T., 2015. Recyclability of bottom ash mixed with dredged soils according to the transportation distance and mixing ratio through the estimation of CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of environmental management* 156, 244-251.
18. Organization, I.S., 2006. ISO 14040: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.
19. Organization, I.S., 2006. ISO 14044: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines. ISO.
20. Park, J., Son, Y., Noh, S., Bong, T., 2018. An evaluation of the environmental safety and geochemical characteristics of coal combustion products. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-9.
21. Rooney, D., Brown, K., Thomas, J., 1998. The effectiveness of capillary barriers to hydraulically isolate salt contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 104, 403-411.
22. Ryu, J.H., Chung, D.Y., Ha, S.K., Lee, S.B., Kim, S.J., Kim, M.T., Park, K.D., Kang, H.W., 2014. Capillary Characteristics of Water and Cations in Multi-layered Reclaimed Soil with Macroporous Subsurface Layer Utilizing Coal Bottom Ash. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 47, 406-411 (in Korean).
23. Son, Y., Kim, K., Mun, H., 2003. The Undrained Shear Strength Characteristics of Mixed Soil with Oyster Shells. *J. Korean Geotechnol. Soc* 19, 7-14 (in Korean).
24. Sung, C.Y., Kim, Y.I., 2010. Strength and Durability Properties of Polymer Concrete Utilizing Oyster Shell Powder as a Filler. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 52, 125-134 (in Korean).
25. Yoon, H.S., Yang, T.S., 2004. Mechanical characteristics of crushed oyster shell. *Journal of Korean Society of Urban Environment* 4,

- 39-45 (in Korean).
26. 구해식, 2008. 폐각류를 잔골재 대체재로 사용한 철근콘크리트 기둥의 내력 및 거동에 관한 실험적 연구. 한국생태환경건축학회 논문집 8, 69-76.
  27. 국가기술표준원, 2015. KS F 2322 흙의 투수 시험 방법.
  28. 국가기술표준원, 2017. KS F 2302 흙의 입도 시험 방법.
  29. 국립식량과학원, 2015. 간척지 발작물 재배를 위한 최적 제염기술 개발, 농촌진흥청.
  30. 국토교통부, 2015. 도로공사표준시방서.
  31. 국토교통부, 2017. 지적통계 - 2018년 통계연보.
  32. 김강덕, 강승구, 2007. 석탄 바닥재와 점토를 이용한 인공경량골재 제조. 한국결정성장학회지 17, 277-282.
  33. 김동근, 손영환, 박재성, 봉태호, 2015. 성토재료의 활용을 위한 Bottom Ash 의 파쇄지수 산정 및 투수계수 변화. 한국농공학회논문집 57, 107-115.
  34. 김상천, 2009. Sand Mat 용 재료로서 Bottom Ash 의 적용성에 관한 연구. 한양대학교 석사학위논문.
  35. 김종균, 이한생, 조재규, 이영한, 1995. 굴껍질분(紛)의 화학성(化學性) 및 작물(作物)에 대한 시용효과(施用效果). 한국토양비료학회지 28, 350-355.
  36. 김태진, 2019. 간척지 투수성 개선을 위한 Bottom Ash와 굴폐각의 활용, 서울대학교 박사학위논문.
  37. 농어촌연구원, 2017. 토양개량제를 이용한 간척지의 제염 및 인공식생 조성에 관한 연구, 한국농어촌공사.
  38. 문종익, 정유진, 성낙창, 2002. 하수슬러지와 굴껍질질의 토지주입이 토양오염도에 미치는 영향. 대한환경공학회지 24, 715-724.
  39. 박석호, 김영중, 임동혁, 김충길, 장양, 김성수, 2010. 농용 트랙터 연료소모량에 미치는 요인분석. 바이오시스템공학 (구 한국농업기계학회지) 35, 151-157.

40. 박승철, 2014. 굴 폐각을 이용한 침강성 탄산칼슘 제조 및 자원화를 통한 온실가스 감축량 산정에 관한 연구, 호서대학교 대학원, 천안.
41. 산림청, 2006. 채석 허가 및 복구 제도 개선 방안.
42. 유진희, 정덕영, 황선웅, 이경도, 이상복, 최원영, 하상건, 김시주, 2010. 석고 혼합량에 따른 간척지토양의 양이온 용탈 및 분포. 한국 토양비료학회지 43, 474-479.
43. 윤길림, 권오순, 임영준, 양은익, 2001. 굴폐각 재활용을 위한 공학적 특성 연구. 대한토목학회논문집 C 21, 421-431.
44. 윤태강, 손영환, 박재성, 김동근, 2016. 고흡수성 수지 처리에 따른 토양 수분 함량과 배수 특성 변화. 한국농공학회논문집 58, 47-56.
45. 이기호, 한종옥, 2001. 굴폐각 혼합토의 압밀 및 투수특성. 대한토목학회논문집 C 21, 375-384.
46. 전력거래소, 2018. 2017년도 발전설비현황.
47. 전지훈, 손영환, 김동근, 김태진, 2019. 굴 폐각을 이용한 간척지 배수재의 전과정 CO2 배출량 산정 및 국내 적용성 평가. 한국농공학회논문집, 61, 85-93.
48. 전해표, 2007. 건설분야의 환경 영향 평가를 위한 전과정평가 적용 방법에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문.
49. 정상화, 최명진, 이봉준, 최영준, 2010. 저회의 성토재료 활용성에 대한 실험적 연구. 한국건설순환자원학회논문집 (구), 89-98.
50. 조병완, 박승국, 권병윤, 2004. 알칼리 활성화 석탄회 (Fly Ash, Bottom Ash) 인공경량골재 및 콘크리트 적용. 콘크리트학회 논문집 16, 751-757.
51. 최우석, 손영환, 박재성, 노수각, 봉태호, 2013. Bottom Ash 와 혼합재료의 혼합비 및 양생방법에 따른 강도특성 분석. 한국농공학회논문집 55, 129-140.
52. 한국건설기술연구원, 건축물의 LCA를 위한 원단위 작성 및 프로그램 개발 연구, 건설교통부.
53. 한국건설기술연구원, 2019. 2019 건설공사표준품셈 - 토목·건축·기계



설비, 국토교통부.

54. 해양수산부, 2017. 해양수산통계연보. pp 212, 222.

55. 환경부, 2008. 국가 LCI DB : 통합공로수송,  
<http://www.epd.or.kr/lci/nationalDbView.do?pcategory=4&idx=332>.

56. 환경부, 2018. 토양환경보전법 시행규칙.

## Abstract

# Environmental Evaluation of Oyster Shell and Bottom Ash as Drainage Materials based on Life Cycle CO<sub>2</sub> Emissions

Jihun, Jeon

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems

Seoul National University

Soft grounds such as reclaimed land have been actively developed for maximizing utilization of narrow land area in South Korea. Generally, these grounds are characterized by poor drainage due to high content of fine-graded particles in the soil. These characteristics make it difficult to use for high-value-added purposes such as growing crops and constructing structures. Therefore, measures to improve poor drainage are required for the multifaceted use of these lands.

On the other hand, in Korea, about 200,000 tons of oyster shells are generated, spoiling landscapes, generating odors, and destroying marine ecosystems. Bottom ash is also exported to 110–180 million

tons per year in Korea alone, and many of them are buried and landed causing various environmental problems. Therefore, interest in recycling of oyster shells and bottom ash is increasing. However, in the case of recycling such industrial wastes, there are environmental risks caused by pollution, processing, transportation, and construction due to the recycled material itself. Therefore, the suitability for recycling and environmental evaluation of the material should be preceded.

In this study, the evaluation of material compatibility of oyster shell and bottom ash waste as a drainage material for improvement of drainage performance of ground was performed. The quantitative environmental evaluation was carried out by estimating the life cycle CO<sub>2</sub> emissions, and the recyclability of materials was evaluated based on the results.

As a result of suitability evaluation of the materials for recycling, oyster shell and bottom ash were found to be able to replace sand as mixing and drainage material through horizontal drainage layer. However, the Cu content of the oyster shell and the low CEC of the bottom ash should be taken into consideration during construction. Life cycle CO<sub>2</sub> emissions were estimated and the reduction effects of oyster shell and bottom ash recycling were confirmed and quantitative analysis was conducted. As a result of evaluating the recyclability of the materials, life cycle CO<sub>2</sub> emissions reduction effect was obtained when the target material was used as a substitute for sand in a large area.

The results of this study could contribute to the practical use of oyster shell and bottom ash as eco - friendly drainage material in poor drainage ground. In the future, various additional effects are expected, such as increased throughput of waste, elimination of

natural aggregate supply shortage, expansion of usability of poor drainage grounds.

keywords : Oyster shell, Bottom ash, Recycling, Drainage materials,  
Life cycle CO<sub>2</sub> assessment

*Student Number* : 2017-28752